



**MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA SOUVERAINETÉ
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Conseil général de l'économie

N° 2024/01/CGE/RR

Mars 2025

Méthodologies de prise en compte d'évènements à des échéances différentes

Rapport à

Monsieur le Vice-président du Conseil général de l'Economie

établi par

Philippe DESFOSSES
Administrateur de l'État

Colas HENNION
Ingénieur en chef des mines

Philippe KAHN
Ingénieur général des mines

SOMMAIRE

SYNTHESE	6
TABLE DES RECOMMANDATIONS	8
INTRODUCTION	9
1 Etat des lieux général des travaux d'actualisation socio-économique appliquée au domaine climatique	11
1.1 Qu'est-ce que l'actualisation ?	11
1.1.1 Les principes généraux de l'actualisation	11
1.1.2 L'actualisation dans les évaluations socio-économiques	11
1.1.3 La formule de Ramsey	12
1.1.4 Les valeurs en 2024	12
1.1.5 La corrélation entre risque économique et risque climatique (le bêta climatique)	13
1.1.6 Un recours limité aux taux d'actualisation et au bêta climatique dans les évaluations socio-économiques récentes	14
1.1.7 L'importance d'un calibrage adéquat du taux d'actualisation	15
1.1.8 La nécessité de mettre à jour les paramètres sous-tendant le taux d'actualisation	15
1.1.8.1 L'effet richesse	15
1.1.8.2 L'effet précaution	16
1.2 Application de l'actualisation dans sa dimension climatique dans le cadre de l'évaluation socio-économique	16
1.2.1 Prise en compte de l'impact des émissions de GES : calcul de la valeur socio-économique du carbone	16
1.2.2 La méthode « coûts-bénéfices »	17
1.2.3 La méthode « coûts-efficacité »	18
1.2.4 Les avantages et inconvénients de ces deux méthodes	19
1.2.4.1 La méthode coûts-bénéfices	19
1.2.4.2 La méthode coût-efficacité	19
1.3 Mieux intégrer le changement climatique dans les études économiques	20
2 La prise en compte de la temporalité des émissions elles-mêmes n'est qu'exceptionnelle en France	21
2.1 Les analyses de cycle de vie (ACV) ne prennent en général pas en compte la dimension temporelle	21
2.2 Les engagements internationaux prennent en compte les émissions brutes	21
2.3 Une exception, la RE 2020	22
2.4 Les études économiques ne prennent en compte que rarement la temporalité des émissions	22
2.4.1 Les travaux de France Stratégie sur les coûts d'abattement	22

2.4.2	Le cas des Certificats d'Economie d'Energie (CEE).....	23
2.4.3	Les calculs d'équivalence entre dioxyde de carbone et les autres GES	24
2.5	Le méthane, malgré sa faible durée de vie, doit faire l'objet d'une attention particulière	25
3	Notre connaissance des points de bascule doit-elle conduire à accélérer la décarbonation et à fixer des taux d'actualisation élevés ?	27
3.1	La communauté scientifique a identifié un certain nombre de points de bascule	28
3.2	L'échéance de survenue et l'impact de ces points de bascules sont très variés	31
3.2.1	Le franchissement du seuil de déclenchement de points de bascule n'entraînerait de dommages massifs que s'il concernait deux systèmes climatiques bien identifiés : la disparition de la banquise et celle de la calotte glaciaire antarctique.....	31
3.2.2	Le calendrier de déclenchement des points de bascule comme la durée de réalisation du changement d'état du système climatique concerné sont incertains	32
3.2.3	La communauté scientifique s'inquiète de la potentielle utilisation du renforcement du sentiment d'urgence généré par les points de bascules climatiques pour promouvoir l'utilisation de la géo-ingénierie	33
4	Dans certains cas, la prise en compte du temps peut être utile pour des décisions de politique publique.....	34
4.1	Un exemple d'ACV dynamique : la RE 2020	35
4.2	Les limites de l'ACV dynamique dans la RE 2020	39
4.3	Les ACV dynamiques n'ont de sens que pour des produits à longue durée de vie	39
4.4	Il paraît prématuré de généraliser l'usage des ACV dynamiques compte-tenu des difficultés méthodologiques qu'elles posent	40
4.5	La mise en œuvre d'ACV dynamiques ne paraît pas prioritaire pour les véhicules : l'enjeu est celui de la décarbonation de la production d'électricité	40
4.6	Les enjeux de l'actualisation dans l'exploitation de la forêt.....	43
4.6.1	Les enjeux attachés à l'exploitation de la forêt et au maintien de son rôle de puits de carbone	43
4.6.2	Le bois-construction : stockage du carbone et substitution à des matériaux émissifs ...	44
4.6.3	Bois-énergie et ACV	46
4.6.4	La nécessaire priorité à donner au bois-construction.....	47
4.6.5	Emissions de GES liées à l'exploitation des forêts, cycle de vie et actualisation.....	49
4.6.5.1	La remise en cause de la présumée neutralité carbone du bois-énergie.....	49
4.6.5.2	L'actualisation appliquée à l'utilisation du bois	51
	ANNEXES.....	52
	Annexe 1 : Lettre de mission.....	53
	Annexe 2 : Liste des acronymes utilisés	55
	Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées ou interrogées	56
	Annexe 4 : Bibliographie.....	59
	Annexe 5 : Recours à l'actualisation par les fonds de pension.....	64

Annexe 6 : Méthode « coût-bénéfice » de calcul du coût social du carbone	66
Annexe 7 : Méthode « coût-efficacité » de calcul du coût social du carbone	69
Annexe 8 : Principaux travaux d'évaluation de l'impact économique du changement climatique	71
Annexe 9 : Approches sur les points de bascule climatiques	79
Définition des points de bascule	79
Liste des principaux points de bascule identifiés	79
Difficultés d'anticipation et incertitudes scientifiques	83
Conséquences des dépassements de seuils climatiques	84
Annexe 10 : Capacité de stockage du CO ₂ dans le bois	87
Annexe 11 : Les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) du bois	88

SYNTHESE

La grande majorité des interlocuteurs rencontrés ont souligné à la fois la difficulté mais aussi l'importance de la mission. Au carrefour des compétences des économistes et de celles des climatologues, le sujet n'a cependant apparemment jamais été directement étudié de façon approfondie.

La mission a particulièrement travaillé, comme cela lui était demandé, sur les points de bascule (« tipping points »). Il est apparu que, dans l'état actuel des connaissances, encore limitées, beaucoup n'apparaîtraient pas avant plusieurs dizaines d'années (au-delà de +4 °C de réchauffement planétaire), et un décalage de quelques années dans leur éventuelle survenue avant 2100 ne modifierait qu'à la marge le climat à cette échéance. **Les climatologues rencontrés estiment que les points de bascule, même s'ils sont de plus en plus médiatisés, ne sont pas une raison suffisante pour modifier les objectifs actuels des politiques climatiques (Accord de Paris).** La cible fixée au niveau mondial de la neutralité carbone à l'horizon 2060-2070 est en elle-même suffisamment ambitieuse et robuste sur le plan scientifique, et la priorité reste de tout mettre en œuvre pour l'atteindre. **Ceci est la conclusion principale du rapport.** Elle pourra être réévaluée dans quelques années au vu de l'évolution des connaissances scientifiques.

Les climatologues expriment également la crainte que le narratif autour des points de bascule soit pris comme prétexte par des entrepreneurs et/ou dirigeants politiques aventureux pour justifier la mise en œuvre de techniques de géo-ingénierie, aujourd'hui considérées comme extrêmement risquées. Ainsi pourraient-ils prétendre réduire temporairement le réchauffement climatique et éviter tout effort pour décarboner nos sociétés.

Au cours de ses travaux, la mission s'est penchée sur plusieurs questions connexes où la temporalité des émissions joue un rôle important. Ces questions portent sur des politiques publiques complexes qui pourraient pour chacune d'entre elles nécessiter des travaux approfondis. Même si ses investigations sur ces sujets ont été nécessairement limitées, la mission a estimé utile de formuler un certain nombre de recommandations qui lui paraissent à la fois relever du bon sens et être utiles aux politiques publiques.

Ainsi, comme cela avait déjà été proposé dans un rapport du Conseil général de l'économie de 2022 sur la régulation économique du carbone¹, il convient de généraliser l'usage de la valeur de l'action pour le climat (« rapport Quinet ») dans l'évaluation économique des projets publics, tant pour l'investissement que pour le fonctionnement.

Concernant les prévisions économiques, la mission constate que les modèles économiques sont basés sur l'hypothèse, voire sur le dogme, d'une poursuite de la croissance sur plusieurs siècles. Or l'impact sur la croissance à long terme du changement climatique est de mieux en mieux connu, et reste actuellement largement sous-estimé dans les modèles économiques. De façon plus générale, si les travaux relatifs à l'impact économique de la transition écologique se développent en France, la mission estime qu'il convient de les orienter en priorité vers (i) la connaissance des effets du réchauffement sur l'économie ; (ii) la prise en compte du réchauffement dans les modèles économiques et (iii) la priorisation des nombreuses actions d'adaptation à conduire.

¹ <https://www.economie.gouv.fr/cge/les-outils-de-regulation-economique-du-carbone>

La mission a trouvé que la mise en place d'analyses du cycle de vie (ACV) dynamiques dans le cadre de la RE 2020 est particulièrement intéressante, et s'est demandée dans quelle mesure cette initiative pouvait être généralisée. Il est cependant apparu que les ACV dynamiques posent de nombreuses difficultés scientifiques et méthodologiques, et ne sont adaptées que pour des produits à longue durée de vie. La mission recommande donc d'approfondir les travaux méthodologiques sur l'ACV dynamique, tout en poursuivant le travail sur la qualité des données disponibles pour élaborer les ACV.

Concernant les véhicules électriques et leur comparaison aux véhicules thermiques, le facteur déterminant est la décarbonation des mix électriques utilisés tant pour la production des véhicules électriques que pour leur recharge lors de l'usage. L'évolution dans le temps de ces mix est le principal point à prendre en compte, plus que le décalage des différentiels d'émissions sur la durée de vie de ces véhicules.

Le secteur du bois est le principal secteur où les temporalités sont très longues (plusieurs dizaines d'années, voire siècles), nécessitant des modalités spécifiques de prise en compte. La mission s'est donc penchée sur cette question, sans prétendre se substituer aux missions et travaux spécifiques lancés sur la biomasse.

La réglementation environnementale RE 2020 permet, de façon quelque peu schématique mais ayant le grand mérite d'exister, de valoriser les bénéfices en termes de stockage de CO₂ que l'usage du bois comme matériau de construction génère. La mission s'interroge sur d'autres usages du bois : elle estime que le postulat de la neutralité carbone du bois-énergie doit être remis en cause dans le contexte de la perte d'efficacité du stockage de CO₂ par les forêts, et que l'usage du bois-énergie doit être limité aux sous-produits de la sylviculture et aux déchets issus de la transformation industrielle du bois.

Enfin, la mission s'est penchée sur les facteurs de conversion des émissions de méthane en équivalents d'émissions de CO₂. La difficulté est que le pouvoir de réchauffement global du méthane est considérablement plus élevé que celui du CO₂, mais sa durée de vie beaucoup plus faible. De très nombreuses méthodes de calcul existent, et les études scientifiques successives confirment l'impact massif du méthane sur le réchauffement climatique et estiment des coûts d'abattement très faibles pour nombres de mesures de réduction des émissions de méthane. Ceci conduit la mission à recommander d'accélérer la diminution des émissions de méthane pour réduire les risques de dépassement des objectifs fixés par l'Accord de Paris.

*

* *

TABLE DES RECOMMANDATIONS

Avertissement : l'ordre dans lequel sont récapitulées ci-dessous les recommandations du rapport ne correspond pas à une hiérarchisation de leur importance mais simplement à leur ordre d'apparition au fil des constats et analyses du rapport.

Recommandation n° 1.	[DG Trésor et France Stratégie, en lien avec le COR] Piloter des travaux d'estimation de la croissance économique à long terme en France, en prenant en compte l'état de l'art des prévisions climatiques et de leur impact sur l'économie..... 16
Recommandation n° 2.	[France Stratégie] Mettre à jour les paramètres retenus pour le calcul du taux d'actualisation socio-économique en France, en se basant sur les hypothèses de croissance à long terme définies avec la DG Trésor et en lien avec le COR..... 16
Recommandation n° 3.	[MEFSIN, en lien avec MTE et France Stratégie] Approfondir les travaux économiques en priorité vers : (1) la connaissance des effets du réchauffement sur l'économie ; (2) la prise en compte du réchauffement dans les modèles économiques ; (3) la priorisation des nombreuses actions d'adaptation à conduire. 21
Recommandation n° 4.	[MASA, MEFSIN, MTE, MAE] Intensifier les efforts de réduction des émissions de méthane.....26
Recommandation n° 5.	[MTE, MESR, ADEME] Poursuivre les travaux scientifiques sur l'ACV dynamique et développer les bases de données de référence que cette méthode nécessite.....40
Recommandation n° 6.	[MTE, MASA] Réserver les parties du tronc aptes à la construction pour le bois-construction et ainsi restreindre le bois-énergie aux sous-produits de la sylviculture (branches, houppiers, éclaircies) et aux déchets issus de la transformation industrielle du bois. 49
Recommandation n° 7.	[MTE, MASA] Considérer l'introduction d'une obligation de replanter les parcelles dont les arbres sont exploités pour alimenter la filière de matériaux bio sourcés et prévoir une adaptation des fiches FDES en conséquence.49

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de travail 2024 du Conseil Général de l'Economie (CGE) approuvé par le Ministre, il nous a été demandé de travailler sur la question de l'« **actualisation** » **des émissions de gaz à effet de serre** (GES). Plus précisément, il s'agit d'étudier comment prendre en compte des séquences d'émissions variables dans le temps.

L'exemple le plus fréquemment cité est celui du véhicule électrique, dont la fabrication se traduit par un surcroît d'émissions par rapport à un véhicule thermique, surcroît dont on espère qu'il sera « remboursé » un certain nombre d'années plus tard lorsque les moindres émissions à l'usage auront permis de l'« amortir ». Lorsque l'on fait ce type de comparaisons, la question se pose de savoir s'il faut comptabiliser différemment les émissions selon leur date de survenance par exemple en utilisant un taux d'actualisation comme le font les économistes lorsqu'ils comparent des séries de recettes ou dépenses. Une des autres questions à l'origine de la mission est celle des « points de bascule » (« tipping points » en anglais) : les articles se multiplient sur des phénomènes physiques fortement impactants qui pourraient se produire à une échéance de temps potentiellement proche et avoir des conséquences dramatiques et irréversibles, comme par exemple la fonte de la calotte glaciaire en Antarctique. **Faut-il, pour éviter ce type de phénomène, donner une importance accrue à la baisse des émissions à court terme ?**

Pour illustrer cette problématique, on peut de façon schématique se demander comment comparer le scénario d'une séquence de 5 tCO₂e évitées en 2025 puis aucune entre 2026 et 2030 à celui d'une séquence de 1 tCO₂e évitée chaque année de 2025 à 2030 ? Le premier cas économise moins de CO₂ mais dès la première année, alors que le second cas économise davantage de CO₂ mais sur une période plus longue.

La question posée est au croisement de la science économique et de la science du climat. Pour y répondre, la mission a rencontré une grande variété d'interlocuteurs, essentiellement des administrations, des économistes, des climatologues ou autres experts. Elle a également eu accès à une très abondante documentation, tant sur l'actualisation économique en général, que sur l'économie du climat, ou la climatologie elle-même, sans d'ailleurs trouver un seul article traitant directement de la question posée.

Le travail de la mission s'est structuré autour de **quatre grandes directions**, qui sont reprises dans les quatre parties de ce rapport.

Dans un premier temps, elle a étudié **les principes économiques à la base des calculs d'actualisation**, ainsi que les principales méthodes utilisées pour prendre en compte le changement climatique dans l'évaluation socio-économique, notamment au travers du prix social du carbone.

Elle a ensuite essayé de **recenser les situations où la temporalité des émissions est d'ores et déjà prise en compte**, d'une façon ou d'une autre, dans le calcul économique : la partie 2 décrit ces rares exemples, comme la comparaison entre l'impact des émissions de méthane et de celles de CO₂, dont les durées de vie et le pouvoir réchauffant sont très différents, ou la mise en œuvre d'analyses du cycle de vie (ACV) dynamiques dans le cadre de la réglementation environnementale RE 2020.

La troisième partie dresse un **état des lieux simplifié de la connaissance actuelle des points de bascule** et propose les conclusions à en tirer.

Enfin, la quatrième partie approfondit la question des **ACV dynamiques** à travers l'exemple de la RE 2020, s'interroge sur l'opportunité de la généralisation de cette méthode et étudie sommairement comment ces questions s'appliquent aux secteurs du véhicule électrique ou du bois.

De nombreuses annexes plus détaillées, ainsi qu'une bibliographie, complètent ces éléments pour le lecteur qui souhaiterait les approfondir.

1 ETAT DES LIEUX GENERAL DES TRAVAUX D'ACTUALISATION SOCIO-ECONOMIQUE APPLIQUEE AU DOMAINE CLIMATIQUE

1.1 Qu'est-ce que l'actualisation ?

1.1.1 Les principes généraux de l'actualisation

L'actualisation permet de ramener à une même date des flux monétaires intervenant à des périodes (habituellement des années) différentes, et donc de pondérer ces flux en fonction du moment où ils se produisent. Un taux d'actualisation est utilisé à cet effet. Un taux d'actualisation élevé minore le poids du futur, un taux faible signifie que l'on se préoccupe davantage des générations à venir.

C'est particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'évaluer la pertinence d'un projet ayant une durée de plus de 5 ans (projets industriels, bâtiment, infrastructures énergétiques, de transport...). En effet, schématiquement, un investissement coûte cher au début pour sa construction puis rapporte tout au long de sa durée de vie, au cours de laquelle des dépenses devront être consenties pour exploiter, entretenir, renouveler l'ouvrage. Il peut à nouveau coûter en fin de vie lors du démantèlement. A l'inverse, l'investissement génère des gains que les économistes tentent de convertir en unités monétaires du moment de la prise de décision. Il faut donc comparer des gains et des coûts qui interviennent à des moments différents.

Cette mécanique peut être utilisée par les entreprises dans leurs calculs financiers. Dans ce cas, le taux d'actualisation s'appuie sur le coût de la ressource financière spécifique au projet pour l'entité qui réalise l'investissement. L'annexe 5 l'illustre avec le cas des fonds de pension qui doivent calculer la valeur actuarielle des engagements qu'ils inscrivent à leur passif².

Elle est également utilisée par les pouvoirs publics dans des évaluations socio-économiques où le calcul économique se distingue des calculs financiers sur trois points essentiels : il adopte la conception la plus large possible des gains d'un projet pour la collectivité (vies sauvées, temps gagné, pollution évitée...) ; il mesure ces gains – et les coûts – sur un horizon de long terme ; il les actualise à un taux plus faible que celui d'un investisseur privé, reflétant notamment l'absence de nécessité pour l'Etat de rémunérer ses fonds propres et sa capacité à porter et à diluer les risques.

1.1.2 L'actualisation dans les évaluations socio-économiques

Dans le cas du calcul socio-économique, la littérature académique décompose souvent le taux d'actualisation en trois contributions distinctes :

- **Une mesure de la préférence pure des agents économiques pour le présent**, c'est-à-dire une préférence pour un bien-être immédiat par rapport à un bien-être futur identique, qui a une valeur strictement positive. Lorsque l'on raisonne sur un horizon de temps supérieur à une génération, la préférence pour le présent perd de sa pertinence et soulève des débats éthiques importants. L'équité entre générations plaiderait pour un taux de préférence pure égal à zéro.
- **La mesure d'un effet richesse** qui, via une anticipation de la croissance économique, conduit à accorder moins de valeur à un gain de consommation demain qu'au même gain aujourd'hui.

² C'est-à-dire l'engagement de payer la dernière pension de retraite due au dernier retraité s'ils venaient à être fermés et gérés en extinction.

Ainsi, en investissant dans l'avenir dans une économie en croissance, on appauvrit les générations présentes au profit des générations futures qui seront elles-mêmes relativement plus riches en raison de la croissance supposée positive et accorderont ainsi relativement moins de valeur à une unité de consommation supplémentaire.

- **La mesure d'un effet de précaution** : l'incertitude de la croissance de la consommation conduit à épargner à titre de précaution et donc à reporter, éventuellement, une partie de la consommation sur le futur. Cela traduit donc l'octroi d'une importance accrue au futur et ainsi, cet effet de précaution contribue négativement au calcul du taux d'actualisation.

1.1.3 La formule de Ramsey

Cette décomposition en trois éléments est reprise dans la formule dite « de Ramsey », introduite en 1928 puis progressivement raffinée, dont la structure est comme suit dans sa version dite « élargie »³ :

$$\rho = r_f + \beta \cdot \phi$$

Où :

- ρ est le taux d'actualisation
- r_f représente le taux d'actualisation sans risque
- β représente l'élasticité des bénéfices socioéconomiques propres au projet aux variations du PIB/hab : il indique de combien augmentent en moyenne les bénéfices nets du projet (en pourcentage) lorsque le produit par habitant augmente de 1 %. Il est spécifique au projet évalué.
- ϕ représente le risque systémique dépendant de l'incertitude de la croissance économique future

Avec :

- $r_f = \delta + \gamma \cdot \mu - 0.5 \cdot \gamma^2 \cdot \sigma^2$
- $\phi = \gamma \cdot \sigma^2$

Où :

- δ est le **taux de préférence pour le présent**
- γ représente l'aversion instantanée au risque
- μ est le taux de croissance du PIB réel par tête, en moyenne annuelle sur la période de calcul
- σ est l'écart type (« volatilité ») du taux de croissance du PIB réel par tête
- $(\gamma \cdot \mu)$ représente l'**effet richesse**
- $(-0.5 \cdot \gamma^2 \cdot \sigma^2)$ représente l'**effet précaution**

1.1.4 Les valeurs en 2024

Les valeurs en vigueur en France de ces paramètres ont été publiées par le comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics, mis en place par France Stratégie en 2017 et présidé par Roger Guesnerie, dans son guide de 2023 (pour la période de 2021 à 2070) :

$$\rho = 1,2 \% + \beta \cdot 2 \%$$

³ Le complément opérationnel I du rapport Guesnerie, finalisé en octobre 2021, dresse notamment l'historique du raffinement progressif des paramètres utilisés en France entre les années 1980 et 2021, avec comme étapes marquantes notamment les rapports Lebègue (2005), Gollier (2011), Emile Quinet (2013) et Guesnerie (2023) : <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-guide-evaluation-investissements-publics-septembre.pdf>

Si le β du projet est inconnu, il est proposé de procéder comme si β était égal à 1 : le taux ρ à utiliser est alors de 3,2 %.

Les hypothèses sous-jacentes des paramètres utilisés dans le calibrage du taux d'actualisation sont les suivantes :

- le taux de croissance du PIB/habitant, μ , est de 1,1524 %, correspondant au scénario moyen bas du Conseil d'Orientation des Retraites (COR) 2020⁴ ;
- le taux de préférence pour le présent, δ , est de 0,435 ;
- la variance du PIB/habitant, σ , est de 0,475, correspondant à la valeur historique de la période de 1913-2016 pour la France⁵ ;
- l'aversion au risque, γ , est de 2,478⁶.

La mise en œuvre de ces calculs implique la définition des coefficients « β » intervenant dans la formule du taux d'actualisation. Le comité d'experts a fixé à titre provisoire des valeurs de ce coefficient pour le secteur des transports et pour le génie civil, en continuité avec les valeurs correspondantes fixées dans le rapport présidé par Émile Quinet et intitulé « Evaluation socio-économique des investissements publics (2013)⁷.

Par exemple, pour les transports :

- voyageurs urbains : 1,1
- voyageurs régionaux : 1,2
- voyageurs longue distance : 1,7
- fret ferroviaire : 1,4⁸

Mais ces valeurs, définies en 2013, doivent être mises à jour pour tenir compte des conditions économiques actuelles et pour être adaptées aux risques futurs tels qu'on peut les appréhender aujourd'hui.

1.1.5 La corrélation entre risque économique et risque climatique (le bêta climatique)

Les économistes se sont intéressés à déterminer un « bêta climatique », afin d'évaluer quelle est la prime de risque à considérer dans les calculs de rentabilité des investissements participant à la lutte contre le changement climatique. La question sous-jacente est la suivante : dans quelle proportion lutter contre le changement climatique réduit-il le risque global porté par les générations futures ?

⁴ https://www.cor-retraites.fr/sites/default/files/2021-05/Rapport_synth%C3%A8se_vmai.pdf

⁵ Le scénario moyen bas à l'horizon 2070 du COR 2020 présente une variance de 0,038 %. Cette variance étant extrêmement faible, ce qui est lié selon la DG Trésor à la période d'estimation du modèle macroéconomique utilisé, le comité d'experts a proposé de lui substituer la variance maximale de la série historique française (G. Cette) sur la période de 1913 à 2016 qui a connu les désastres majeurs de l'histoire moderne (guerre de 1914-1918, grande dépression, guerre de 1939-1945, crise pétrolière, crise financière, etc.).

⁶ Cette valeur résulte d'un accroissement de l'incertitude sur le futur lié à la pandémie du Covid et de la volonté de garder le niveau de la prime de risque ϕ de 2 %. Il a fallu augmenter l'aversion au risque γ jusqu'à 2,478 alors qu'elle était de 2 dans les rapports Gollier (2011) et É. Quinet (2013).

⁷ https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/CGSP_Evaluation_socioeconomique_17092013.pdf

⁸ Les β sectoriels varient dans cet exemple en fonction du type de déplacement. En effet, β représente l'élasticité des avantages nets du projet par rapport au PIB par tête. Or si le PIB/hab diminue, les ménages réduiront d'abord la voilure sur les transports longue distance coûteux et très liés au tourisme et préserveront les transports urbains, liés au aller-retours domicile-travail.

Dans le complément 5 « Rappels sur le taux d'actualisation » du rapport « la valeur de l'action pour le climat » de la commission présidée par Alain Quinet⁹, Christian Gollier et Alain Quinet proposent de prendre en compte deux canaux de transmissions, donnant des corrélations opposées :

- canal économique : si la croissance est faible, les émissions croîtront moins, et les dommages climatiques également. À l'inverse, si la croissance est forte, les émissions croîtront davantage et les dommages climatiques également ;
- canal climatique : si la sensibilité du climat au CO₂ est plus forte qu'anticipé, les dommages climatiques seront plus élevés¹⁰. Si la sensibilité du climat au CO₂ est moins forte qu'anticipé, les dommages climatiques seront plus faibles et le PIB peu affecté.

La valeur du bêta dépend alors de la nature de l'incertitude :

- si l'incertitude principale porte sur le rythme du progrès technique à faibles émissions – qui contribue à déterminer la croissance économique –, le bêta climatique est positif ;
- si l'incertitude principale sur la croissance porte sur l'ampleur des dommages causés par le changement climatique, le bêta climatique est négatif.

A ce stade, l'étude du sujet n'a pas dépassé ces réflexions théoriques.

1.1.6 Un recours limité aux taux d'actualisation et au bêta climatique dans les évaluations socio-économiques récentes

Cette démarche d'évaluation socio-économique est censée être mise en œuvre en amont de toute décision d'investissement public d'un montant de plus de 20 M€ depuis la loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) du 30 décembre 1982, élargie par la loi de programmation des finances publiques (LPFP) pour les années 2012 à 2017¹¹.

Néanmoins, les audits conduits en 2016 et 2023 par l'Inspection générale des finances (IGF) sur les prérogatives du SGPI en matière d'inventaire et de contre-expertise des évaluations socio-économiques montrent que le dispositif, s'il connaît un développement très significatif, rencontre encore des difficultés opérationnelles pour être bien implémenté de manière utile à la décision publique.

Faute de corpus bien établi, les évaluations socio-économiques en dehors des secteurs les plus matures (secteur des transports essentiellement) fixent par défaut à 1 le facteur de risque spécifique au projet (coefficient β), faute de pouvoir le calculer. De plus, les débats au sein de l'évaluation socio-économique portent bien davantage sur des hypothèses économiques (hypothèses de trafic dans le cas de la

⁹ https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-quinet-complements_18fevrier.pdf

¹⁰ Voir par exemple l'évaluation régulière des dommages climatiques par le réassureur Swiss Re : <https://www.swissre.com/press-release/Hurricanes-severe-thunderstorms-and-floods-drive-insured-losses-above-USD-100-billion-for-5th-consecutive-year-says-Swiss-Re-Institute/f8424512-e46b-4db7-a1b1-ad6034306352> et historiquement le rapport présidé par Michael R. Bloomberg, Henry M. Paulson Jr et Thomas F. Steyer, intitulé « [RISKY BUSINESS: The Economic Risks of Climate Change in the United States](#) », publié en juin 2014.

¹¹ L'article 14 de la LOTI dispose que les investissements relatifs aux infrastructures, équipements et matériels de transport donnant lieu à financement public doivent être évalués à l'aide de critères homogènes intégrant les dimensions économiques, sociales et environnementales des projets. Le décret n° 2013-1211 du 23 décembre 2013 relatif à la procédure d'évaluation des investissements publics, pris en application de la LPFP 2012-2017, étend l'obligation à tous les investissements publics civils et en précise les attendus.

prolongation de la ligne de métro n°1 ; estimation du gain de temps de trajet généré par l'autoroute A69 permettant d'évaluer le gain de PIB qui en découle) que sur les impacts climatiques.

30 % des évaluations socio-économiques des dossiers contre-expertisés sous l'égide du SGPI en 2021 et 2022 ne comportent toujours pas d'indicateurs socio-économiques. Il s'agit principalement des projets hospitaliers et de déploiement du très haut débit ou encore de la construction de prisons. A fortiori, aucun bêta climatique n'a été calculé.

Force est de constater qu'il est compliqué de vouloir inscrire dans le calcul économique l'évaluation de projets dont les impacts peuvent difficilement être quantifiés (construction de places de prison, culture, éducation, santé, etc.).

1.1.7 L'importance d'un calibrage adéquat du taux d'actualisation

Conduire des évaluations de projet avec un taux d'actualisation erroné peut entraîner une allocation inefficace des ressources publiques. Un taux trop faible peut conduire à un excès d'investissements ; un taux trop élevé, qui minore les bénéfices attendus à long terme relativement aux coûts à supporter à court terme, peut conduire à un déficit d'investissement. Une prime de risque trop faible (et/ou insuffisamment différenciée selon les projets) conduit à une mauvaise évaluation de la connexion entre risques sectoriels et risque collectif. En particulier, le taux unique de 3,2 % utilisé ne permet pas de tenir compte du caractère de long terme spécifique et contracyclique des investissements publics dans le domaine de la santé¹².

1.1.8 La nécessité de mettre à jour les paramètres sous-tendant le taux d'actualisation

1.1.8.1 L'effet richesse

Concernant l'effet richesse (terme $\gamma \cdot \mu$ dans la formule du taux d'actualisation sans risque de la formule de Ramsey élargie), cette composante, souvent prépondérante, est basée sur les hypothèses du COR de 2020 : 1,3 % de croissance annuelle de la productivité du travail et 7 % de taux de chômage. Or, celles-ci ont été largement revues à la baisse par le COR fin 2021 suite aux conclusions d'un séminaire du COR intitulé « Le COR est-il trop optimiste ? » où de nombreuses contributions académiques ont souligné les surestimations de la croissance à long terme. Les dernières hypothèses du COR de juin 2024 (productivité de 1 % + taux de chômage à 4,5 %), que certains économistes jugent optimistes, devraient conduire à une réduction significative du taux d'actualisation.

Par ailleurs, l'amélioration de la compréhension des phénomènes climatiques à l'œuvre renforce régulièrement l'estimation des impacts négatifs du changement climatique sur la croissance économique, et **réduit donc le terme $\gamma \cdot \mu$** (comme l'illustre l'annexe 8) **et donc le taux d'actualisation**.

¹² En effet, il est globalement assumé qu'une baisse de richesse conduit à une dégradation de la santé de la population. Ainsi, un investissement en santé est d'autant plus utile que la richesse diminue et le coefficient β est donc négatif, conduisant à un taux d'actualisation bas (très probablement inférieur à 3,2 %) ce qui renforce la valeur socio-économique de ce type de projet. Un taux unique tend donc à sous-estimer la valeur de ce type de projet.

Recommandation n° 1. [DG Trésor et France Stratégie, en lien avec le COR] Piloter des travaux d'estimation de la croissance économique à long terme en France, en prenant en compte l'état de l'art des prévisions climatiques et de leur impact sur l'économie.

Enfin, les références aux hypothèses du COR diffèrent entre les paramètres retenus pour l'évaluation socio-économique en général qui se rapportent aux hypothèses de 2023, contrairement à ceux retenus pour le calcul du taux d'actualisation qui restent basés sur les hypothèses du COR 2020.

Recommandation n° 2. [France Stratégie] Mettre à jour les paramètres retenus pour le calcul du taux d'actualisation socio-économique en France, en se basant sur les hypothèses de croissance à long terme définies avec la DG Trésor et en lien avec le COR.

1.1.8.2 L'effet précaution

Concernant l'effet précaution, les études académiques montrent une incertitude importante, mais asymétrique¹³, sur l'impact du changement climatique sur la croissance future. Or, l'effet de précaution est approximé par un terme proportionnel au carré de la volatilité du PIB par habitant ($0.5 \cdot \gamma^2 \cdot \sigma^2$) qui s'accroît donc mécaniquement si l'incertitude augmente. Il est donc considéré que ce terme du taux d'actualisation est aujourd'hui sous-estimé en valeur absolue d'une part du fait de l'augmentation de l'incertitude du niveau d'impact du climat sur l'économie, d'autre part du fait de la non prise en compte de la probabilité d'évènements climatiques critiques.

Ce constat devrait conduire à augmenter la valeur de l'effet de précaution et donc à diminuer le taux d'actualisation.

1.2 Application de l'actualisation dans sa dimension climatique dans le cadre de l'évaluation socio-économique

1.2.1 Prise en compte de l'impact des émissions de GES : calcul de la valeur socio-économique du carbone

Les bénéfices pour la collectivité induits par la lutte contre le changement climatique (en fait la réduction des dommages liés à l'absence de réduction des émissions) ne sont pas spontanément pris en compte dans les calculs de rentabilité financière des acteurs publics et privés. Aussi, pour internaliser ces bénéfices, on calcule le coût que l'on serait prêt à payer pour permettre d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO₂. On l'appelle traditionnellement « valeur de l'action pour le climat » (VAC), ou encore valeur sociale du carbone. Elle permet ainsi d'intégrer les bénéfices collectifs que procure la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le processus de hiérarchisation des projets à mener. L'établissement d'une valeur de l'action pour le climat peut renvoyer à plusieurs logiques.

¹³ Compte-tenu du conservatisme des scientifiques, il est plus probable que les risques d'évènements extrêmes soient sous-estimés que surestimés.

1.2.2 La méthode « coûts-bénéfices »

La première, dite coûts-bénéfices, consiste à identifier la valeur du carbone qui égalise :

- le coût marginal des dommages liés à l'émission d'une tonne équivalent de CO₂ et
- le coût marginal de la réduction de ces mêmes dommages.

Cette logique, inspirée des travaux historiques d'Arthur Pigou sur les externalités, a été appliquée dès les premiers travaux sur le climat de William Nordhaus, puis reprise notamment dans le rapport Stern (2006). Elle conduit à calculer, au niveau mondial, le dommage subi par l'humanité du fait de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, indépendamment du pays à l'origine de l'émission et de la localisation des dommages. C'est la méthode qui est retenue aux Etats-Unis¹⁴ par exemple et la valeur du carbone ainsi calculée est appelée dans la littérature anglo-saxonne « coût social du carbone » (social cost of carbon). Traditionnellement, cette valeur sociale du carbone est l'aboutissement de l'application en série de quatre modules :

- **Module socio-économique** : Elaboration des projections des variables socioéconomiques et des émissions de GES à la résolution spatiale et temporelle requise par les modules sur le climat et les dommages¹⁵.
- **Module climatique** : Estimation de l'effet des émissions sur les variables climatiques physiques, telles que la température, et à s'assurer que les résultats du modèle climatique sont à la résolution spatiale et temporelle requise par le module de dommages.
- **Module dommages climatiques** : Le module de dommages contient les « fonctions de dommages » de base du processus d'estimation du coût social du carbone. Les fonctions de dommages traduisent les paramètres physiques du changement climatique (en premier lieu la température) en estimations monétisées des dommages économiques nets.
- **Module d'actualisation** : Les dommages résultent de l'accumulation des GES dans l'atmosphère au fil du temps. Comme les GES ont une durée de vie parfois très longue, les dommages en résultant se produisent pendant plusieurs décennies voire siècles. Dans le cadre du calcul de la valeur sociale du carbone, le flux des dommages marginaux futurs, tel qu'estimé dans le module précédent, est calculé en termes de consommation réduite (ou d'équivalents de consommation monétaire). Le flux de dommages futurs est ensuite actualisé à sa valeur dans l'année où l'unité supplémentaire d'émissions a été libérée. Étant donné l'horizon temporel long sur lequel les dommages sont censés se produire, l'approche d'actualisation influence grandement la valeur actualisée nette (VAN) des dommages futurs.

Plus de détails sur cette méthode sont donnés en annexe 6.

¹⁴ Voir « EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances » (2023) : https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf

¹⁵ Les projections des émissions de GES servent d'entrées au module sur le climat, et les projections du PIB et de la population servent d'entrées aux modules sur la fonction de dommages et d'actualisation. Ces variables sont donc considérées comme exogènes...

1.2.3 La méthode « coûts-efficacité »

Une autre démarche, complémentaire à la précédente, est dite coûts-efficacité. Celle-ci consiste à identifier la valeur d'une tonne de CO₂e évitée que les acteurs économiques devraient prendre en compte dans leurs décisions de consommation ou d'investissement pour que le pays atteigne ses objectifs de décarbonation. Par rapport à une démarche « coûts-bénéfices », cette logique permet de s'affranchir des incertitudes sur l'évaluation des dommages, en se fondant sur un objectif reflétant les préférences collectives.

C'est la méthode qu'a retenue la France, de façon à optimiser sur le plan économique la trajectoire permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 prévu par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC)¹⁶. Ainsi la commission Quinet a proposé une trajectoire de la valeur tutélaire du carbone (VTC). Cette VTC représente la valeur pour la société des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui doit permettre d'atteindre l'objectif de neutralité.

Le déploiement de cette méthode se fait ainsi en trois étapes :

- définition d'objectifs de décarbonation (Accord de Paris au niveau mondial, Green Deal au niveau européen, SNBC au niveau français) ;
- identification des actions à mener pour atteindre ces objectifs et priorisation (notamment à partir des coûts d'abattement, cf. travaux de la commission Quinet¹⁷ et de la commission Criqui¹⁸) ;
- définition d'une courbe d'évolution de la valeur tutélaire du carbone (VTC) pour atteindre les objectifs de décarbonation via la rentabilisation économique progressive des actions de décarbonation.

Dans le cadre d'une évaluation socio-économique en France, c'est donc la valeur de la VTC que l'on applique aux émissions de GES de chaque année avant de procéder à l'actualisation de l'ensemble des coûts et revenus. Ce faisant, il est à noter que cette approche n'intègre donc pas de différence d'impact climatique liée au décalage temporel des émissions de GES.

Il est à noter que cette trajectoire de VTC vient d'être mise à jour en mars 2025 par une commission à nouveau présidée par Alain Quinet¹⁹ pour intégrer les évolutions liées au paquet européen Fit for 55 et à la SNBC 3 en cours de finalisation²⁰. Les principales évolutions de la VTC sont :

- le niveau de départ 2025 de la valeur de l'action pour le climat est sensiblement rehaussé, de 187 €₂₀₂₃ à 256 €₂₀₂₃. Cette revalorisation est cohérente avec le relèvement de l'objectif intermédiaire de réduction des émissions brutes 2030 de -40 % à -50 % par rapport à 1990. Ce

¹⁶ SNBC 2 au moment de la Commission Quinet 2019 qui a élaboré la première courbe de valeur tutélaire du carbone en France.

¹⁷ La commission présidée par Alain Quinet, appuyée par les équipes de France Stratégie, a procédé à une identification des principales options stratégiques en matière de décarbonation, secteur par secteur, puis à des estimations de coûts d'abattement sur la base d'hypothèses d'effets d'apprentissage sur ces technologies et de prospective technologique

¹⁸ Le travail de la commission Quinet a été repris par la commission sur les coûts d'abattement présidée par Patrick Criqui pour procéder à des évaluations assez précises des coûts d'abattement actuel de plus options stratégiques principales : transports, électricité, hydrogène, logement, ciment, acier.

¹⁹ <https://www.strategie.gouv.fr/publications/la-valeur-de-laction-pour-le-climat-une-reference-pour-evaluer-et-agir>

²⁰ La consultation publique a été lancée en novembre 2024.

relèvement permet une meilleure répartition des efforts dans le temps entre aujourd'hui et 2050. Il est en outre cohérent avec le fort besoin d'investissements supplémentaires d'ici 2030 identifié dans le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023) sur les incidences économiques de l'action pour le climat.

- à partir de ce point de départ sensiblement rehaussé, la valeur de l'action pour le climat progresse chaque année au rythme du taux d'actualisation.

Plus de détails sur cette méthode sont donnés en annexe 7.

1.2.4 Les avantages et inconvénients de ces deux méthodes

1.2.4.1 La méthode coûts-bénéfices

Beaucoup d'incertitudes entourent l'évaluation monétaire des dommages nécessaire à l'analyse coûts-bénéfices, dans la mesure où le calcul est très sensible au choix de certains paramètres-clés (la valorisation des dommages, l'actualisation, etc.) encore mal connus ou relevant de la prospective :

- la difficulté de ce type d'approche tient notamment à l'estimation de la courbe de dommage marginal, sur laquelle il est difficile d'obtenir un consensus ;
- les effets des variations de température sur l'économie sont difficiles à valoriser. Une partie de ces dommages présente un caractère marchand – perte potentielle de PIB en raison de la limitation des ressources naturelles et de la destruction de capital productif en cas de catastrophe. Mais une autre partie, non marchande, concerne les pertes de vies humaines liées aux catastrophes naturelles, la perte de biodiversité et les risques de destruction de sociétés et d'écosystèmes ; les méthodes d'évaluation de celles-ci sont très controversées, notamment en donnant une valeur différente à la vie en fonction des pays ;
- les conséquences de l'incertitude sont amplifiées par la présence de nombreuses inerties, voire d'irréversibilités, tant dans le système climatique que dans les systèmes techniques, économiques et sociaux.

A un niveau national, ces difficultés limitent la possibilité d'une mise en œuvre efficace :

- d'abord les incertitudes sur la valorisation des dommages sont trop fortes pour construire une référence ayant vocation à guider l'action politique de court-moyen terme ;
- ensuite, il est difficile, s'agissant d'une externalité globale, d'isoler un bilan coûts-bénéfices aux frontières d'un territoire particulier.

Les Etats-Unis se sont néanmoins tournés vers cette méthode faute d'objectifs clairs de décarbonation pour leur pays, contrairement à l'Union européenne avec l'objectif « net zero 2050 », ce qui constitue un obstacle fort à l'application de la méthode coût-efficacité.

1.2.4.2 La méthode coût-efficacité

La difficile question de la valorisation des dommages étant écartée dans cette méthode par la définition ex ante d'un objectif de réduction d'émission, c'est l'évolution des technologies de décarbonation de l'économie mises en œuvre qui devient l'hypothèse centrale. Le rôle pivot des coûts d'abattement dans cette méthode génère les défis suivants :

- Le choix du référentiel. Dans toute évaluation économique, la détermination de la situation de référence est essentielle pour le calcul des coûts ;
- Les inerties, effets dynamiques et interdépendances. Le classement des options par ordre de mérite répond en apparence au souci d'efficacité qui caractérise les approches économiques. En réalité, il est souvent nécessaire d'entreprendre des actions coûteuses afin de débloquent l'accès à d'autres potentiellement moins coûteuses.
- Les incertitudes technologiques. Il faut introduire dans le calcul des hypothèses sur le progrès technique et l'évolution des coûts et performances des différentes options ou technologies.
- Les coûts et avantages externes, de différente nature, environnementaux, macroéconomiques ou géopolitiques, engagés par les actions de réduction des émissions.

1.3 Mieux intégrer le changement climatique dans les études économiques

La question de l'impact économique de la transition économique a fait l'objet en France de travaux accrus ces dernières années. Parmi les rapports de référence, on peut citer :

- le rapport sur les grands défis économiques, dont la lutte contre les dérèglements climatiques, par la commission internationale animée par Blanchard et Jean Tirole²¹ ;
- le rapport sur les incidences économiques de l'action pour le climat, par Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz²².

Plus récemment, la Direction générale du Trésor a annoncé un renforcement de ses capacités d'analyse sur le sujet, avec la création d'une sous-direction spécifiquement consacrée à la transition écologique. Celle-ci a notamment publié, après un rapport de décembre 2023²³, son rapport final sur les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone²⁴.

Comme le souligne ce dernier rapport, les effets économiques du changement climatique pour la France sont encore insuffisamment connus. Ceux-ci seront considérables, tant par les dommages directs de catastrophes dites à tort « naturelles » que par les impacts massifs sur les chaînes d'approvisionnement industrielles, sans compter les impacts et risques géopolitiques accrus. Si ce rapport estime aussi que les coûts de l'action sont plus faibles que les coûts de l'inaction, la mission estime qu'un tel raisonnement n'est valable qu'à l'échelle mondiale. Or, dans la situation actuelle très incertaine où les Etats-Unis se retirent à nouveau de l'Accord de Paris et où la politique énergétique est construite avec l'objectif principal d'accroître la production pétrolière et gazière, il apparaît de plus en plus que l'Union européenne risque d'être le continent dont les objectifs en termes d'atténuation sont les plus ambitieux, tout en étant également massivement affecté par le réchauffement lui-même.

²¹ Juin 2021 - <https://www.strategie.gouv.fr/publications/grands-defis-economiques-commission-internationale-blanchard-tirole>

²² Mai 2023 - https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/incidences-economiques-rapport-de-synthese_0.pdf

²³ Décembre 2023 - <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/ff6787fc-4f79-4b98-b3d4-e6ea0d6c8205/files/c5d56f29-e0a3-4a33-8bf3-a1770d96e25f>

²⁴ Janvier 2025 - <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/fe03c69a-9590-4368-b95e-ed761a023f53/files/5e8fa818-5c7d-48f5-aa60-c9ce4057b6b7>

Même si elles ne pourront que très partiellement permettre de faire face à ces dommages, les politiques d'adaptation commencent à être identifiées. Leur coût sera considérable, impactant lui-même aussi largement l'économie. Les dépenses devront être priorisées, avec des indicateurs d'efficacité à construire, par analogie avec les coûts d'abattement pour les dépenses d'atténuation.

Dans ce contexte, la mission estime que les travaux économiques devraient être dirigés en priorité vers la connaissance des effets du réchauffement sur l'économie, vers la prise en compte du réchauffement dans les modèles économiques, ainsi que vers la priorisation des nombreuses actions d'adaptation à conduire telles qu'elles figurent dans le 3^{ème} plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC 3).

Recommandation n° 3. [MEFSIN, en lien avec MTE et France Stratégie] Approfondir les travaux économiques en priorité vers : (1) la connaissance des effets du réchauffement sur l'économie ; (2) la prise en compte du réchauffement dans les modèles économiques ; (3) la priorisation des nombreuses actions d'adaptation à conduire.

2 LA PRISE EN COMPTE DE LA TEMPORALITE DES EMISSIONS ELLES-MEMES N'EST QU'EXCEPTIONNELLE EN FRANCE

2.1 Les analyses de cycle de vie (ACV) ne prennent en général pas en compte la dimension temporelle

Les ACV ont pour objectif d'évaluer l'impact global d'un produit ou service de façon aussi exhaustive que possible, « du berceau à la tombe ». Elles peuvent prendre en compte un grand nombre d'impacts environnementaux au-delà des émissions de GES. Les méthodes d'élaboration des ACV ont notamment été précisées par les normes ISO 14040 et 14044. Les différentes étapes de la vie d'un produit sont analysées méthodiquement, et les impacts à chaque étape sont évalués puis additionnés. Il est à noter que **ces additions ne prennent pas en compte le décalage éventuel de calendrier entre les impacts évalués**, alors même que le cycle de vie d'un produit peut durer plusieurs années ou dizaines d'années, entre l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication et l'éventuel recyclage de matières premières issues du produit usagé. Par exemple, dans le cycle de vie d'un véhicule électrique, on prend en compte les impacts de l'extraction de lithium nécessaire à la fabrication de la batterie du véhicule ou les consommations d'électricité à l'usage, mais pas le décalage de temps entre les deux.

2.2 Les engagements internationaux prennent en compte les émissions brutes

Au niveau mondial, les engagements et objectifs de réduction des émissions de GES pris par les Etats se traduisent par des cibles annuelles. Les engagements sont déclinés au niveau européen ou au niveau national. Les méthodologies de calcul font l'objet de définitions précises par la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et le GIEC.

Au niveau français, les calculs d'émissions sont faits par le CITEPA, à travers une méthodologie détaillée dite « OMINEA ». Les calculs sont basés sur de nombreux modèles par secteur et sur de lourdes bases de données, notamment de facteurs d'émissions. **Ces facteurs d'émissions eux-mêmes, issus d'ACV, ne prennent pas en compte la temporalité.**

2.3 Une exception, la RE 2020

La réglementation environnementale de la construction neuve RE 2020, adoptée en 2020 et qui a remplacé la réglementation thermique RT 2012, a introduit de nombreuses nouveautés, dont pour la première fois la prise en compte de coefficients de pondération des émissions suivant l'année où elles ont lieu : plus une émission a lieu tard, plus son impact pendant la période considérée (100 ans à compter du début de la construction) est faible. **Une pondération est donc faite suivant la date des émissions de CO₂.**

Ce point sera détaillé au 4.1 et 4.2.

2.4 Les études économiques ne prennent en compte que rarement la temporalité des émissions

La mission a recensé trois types de situations où c'est le cas, mais de façon en fait disparate et parcellaire.

2.4.1 Les travaux de France Stratégie sur les coûts d'abattement

Ces travaux, animés par Patrick Criqui, ont donné lieu depuis 2019 à plusieurs publications, comme évoqué au chapitre 1.

La partie « méthodologie » du premier rapport explicite notamment plusieurs formules possibles permettant de calculer les coûts d'abattement. L'une d'entre elles, dite du « coût d'abattement ajusté à la VAC », tient compte de l'évolution anticipée de la VAC issue des travaux de la commission Quinet :

FORMULE 2

Coût d'abattement « ajusté à la VAC » à comparer avec la VAC₀

$$CA^2_i = - \frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r)^t}}{\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t} \times VAC_t}{(1+r)^t}}{VAC_0}} \quad (5)$$

Source : rapport France Stratégie précité

La formule du « coût d'abattement ajusté à la VAC » permet d'évaluer le coût de la réduction d'une tonne de CO₂ en tenant compte de l'évolution anticipée de la valeur de l'action pour le climat (VAC)²⁵. Elle est mise en œuvre en intégrant :

- une estimation des coûts immédiats et futurs liés à une action de réduction des émissions ;
- une augmentation programmée dans le temps de la VAC, car les dommages climatiques futurs augmenteront si les actions nécessaires pour respecter les engagements pris en cohérence avec l'Accord de Paris ne sont pas respectés ;
- les bénéfices futurs des actions engagées et valorisées à la VAC de leur année de réalisation, actualisés pour traduire le fait qu'ils ont une valeur moindre aujourd'hui.

Ainsi, cette formule permet de comparer les coûts d'abattement à différentes périodes tout en intégrant l'idée que les gains climatiques futurs (réduction des dommages) ont plus ou moins de poids selon la manière dont la VAC est fixée.

L'inconvénient selon la mission est que, comme la VAC croît rapidement dans le temps, l'application de cette formule pourrait conduire à privilégier des investissements dont les effets sont plus tardifs dans le temps, à des moments où la VAC est plus élevée et donc où ils apparaissent plus « pertinents ».

En pratique, cette formule ne paraît pas utilisée.

2.4.2 Le cas des Certificats d'Economie d'Energie (CEE)

Les modalités de calcul des valeurs des CEE sont parfois citées comme un exemple d'actualisation. Pour être précis, les CEE sont mesurés en kWh d'énergie finale économisée, et les calculs sont basés sur des kWh dits « cumac », mot provenant de la contraction des mots « cumulés » et « actualisés ». Le kWh cumac est ainsi calculé de façon cumulée (c'est-à-dire sur la durée de vie de l'opération d'économies d'énergie réalisée) et « actualisée ». Le « taux d'actualisation » retenu est un taux forfaitaire de 4 %, c'est-à-dire que les économies d'énergie réalisées au cours de chaque année suivant la première année de vie de l'opération sont calculées en divisant par 1,04 les économies de l'année précédente.

En fait, ce taux de 4 % n'est pas un véritable taux d'actualisation qui résulterait de calculs ou de modèles économiques. Il s'agit plus d'une évaluation forfaitaire du taux auquel on pouvait estimer, lorsqu'il a été adopté, que les gains en efficacité énergétique diminueraient dans le temps pour des raisons techniques (vieillesse des opérations). Ceci permet de répondre à une des exigences de la directive « efficacité énergétique » qui prévoit que « le calcul des économies d'énergie doit tenir compte de la durée de vie des mesures et du taux auquel les économies diminuent au fil du temps ».

Le rapport de la mission conduite par le CGE, le CGEDD et l'IGF en 2020 préparant la 5^{ème} période des CEE (non publié mais rendu public par la presse) proposait d'avoir une approche plus précise en introduisant « tant dans les fiches standardisées que pour les opérations au cas par cas, un coefficient de perte d'efficacité annuelle dans le temps ». Cette recommandation n'a pas été suivie d'effets et n'a

²⁵ Comme vu en partie 1, cette valeur est une estimation monétaire actualisée des bénéfices qui sont associés à la réduction d'une tonne des émissions de CO₂, en intégrant les dommages climatiques évités.

pas été reprise dans le rapport de 2024 de la mission conduite par le CGE, l'IGEDD et l'IGF intitulée « Revue du dispositif des certificats d'économies d'énergie en préparation de la 6^{ème} période »²⁶.

2.4.3 Les calculs d'équivalence entre dioxyde de carbone et les autres GES

Depuis de nombreuses années, il a été mis en évidence qu'au-delà du CO₂, de nombreux autres gaz contribuent à l'effet de serre. Dans un souci de comparaison, les climatologues ont défini des facteurs de conversion pour convertir les émissions correspondantes en équivalent d'émissions de CO₂. Le GIEC a ainsi créé une unité nouvelle, l'« équivalent CO₂ », permettant de comparer les impacts des différents GES et de cumuler leurs émissions. En pratique, pour chaque gaz à effet de serre, un « potentiel de réchauffement global²⁷ » (PRG) est attribué, par comparaison avec le CO₂ qui sert de référence et dont le PRG est fixé conventionnellement à 1. Ainsi pour chacun de ces gaz, il est possible de mesurer son effet radiatif cumulé sur une période donnée (typiquement 20, 100, ou 500 ans) par rapport à celui du CO₂.

Dans ce qui suit, la mission s'est intéressée particulièrement à l'exemple du méthane, au fort pouvoir de réchauffement. Une des grandes différences entre le méthane et le CO₂ est que leurs effets ne varient pas de la même façon dans le temps : après quelques milliers d'années, il reste toujours dans l'atmosphère une fraction estimée à 10-15 % du CO₂ émis, alors que le méthane en a totalement disparu en 12 ans²⁸. A l'inverse, le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO₂. On voit bien que, suivant la durée prise en compte dans le calcul de l'impact d'une émission de méthane sur le climat, le PRG du méthane peut être estimé à des valeurs très différentes. Ainsi, selon le rapport du GIEC de 2021, le PRG du méthane peut être évalué à 72 sur une période de 20 ans, à 34 sur une période de 100 ans, et à 7,6 sur une période de 500 ans. **On constate donc que si l'on se basait sur une durée de 20 ans seulement plutôt que de 100, le poids relatif du méthane serait ainsi multiplié par deux**²⁹.

Il existe néanmoins de nombreux débats d'experts sur la manière de comparer les effets des différentes émissions de GES : certains auteurs, avec le « global temperature change potential » (GTP)³⁰, proposent une approche différente qui vise à estimer l'impact d'un GES sur la variation de température mondiale à un instant donné par rapport à celui du CO₂, en tenant compte de la dynamique climatique et des durées de vie dans l'atmosphère des gaz concernés. D'autres proposent d'établir encore une unité commune sur la base des dommages futurs liés aux émissions³¹. Plus récemment, il a été proposé d'appliquer le PRG non plus aux émissions elles-mêmes, mais à leurs variations : il est ainsi question d'un

²⁶ <https://www.economie.gouv.fr/cge/dispositif-cee>

²⁷ Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se définit comme le forçage radiatif (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée de 100 ans.

²⁸ En effet, si l'oxydation conduit à une disparition rapide du méthane, le CO₂ produit par son oxydation reste dans l'atmosphère pendant des siècles et sa concentration atteint une asymptote correspondant à l'équilibre des concentrations de CO₂ dans les différents puits naturels, celui-ci dépendant fortement de la température globale.

²⁹ <https://christiandeperthuis.fr/a-la-recherche-des-bonnes-equivalences-climatiques-entre-co2-et-methane/>.

Beaucoup d'éléments de ce rapport relatifs à la conversion méthane – CO₂ sont issus de cette note.

³⁰ Voir Shine, K.P., Fuglestad, J.S., Hailemariam, K. et al. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Climatic Change* 68, 281–302 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10584-005-1146-9>

³¹ Voir par exemple Boucher, O.: Comparison of physically- and economically-based CO₂-equivalences for methane, *Earth Syst. Dynam.*, 3, 49–61, <https://doi.org/10.5194/esd-3-49-2012>, 2012

PRG³². Celui-ci a fait à son tour l'objet d'une nouvelle version, prenant en compte les impacts indirects des émissions de méthane qui perdurent au-delà de sa durée de vie³³.

Aucune méthode n'apparaît plus à recommander qu'une autre. **Le fait de ne pas « changer de thermomètre » paraît souhaitable**, tout en utilisant autant que possible l'ensemble des données disponibles.

En tout état de cause, si des calculs fort complexes issus de modèles de plus en plus élaborés sont mis en œuvre pour établir ces coefficients d'équivalence, la mission constate que, à sa connaissance, ils ont en commun d'additionner, sur des durées différentes, des impacts d'émissions annuelles sans que des coefficients d'actualisation ou de pondération ne soient mis en œuvre.

2.5 Le méthane, malgré sa faible durée de vie, doit faire l'objet d'une attention particulière

De façon générale, la mission constate que l'impact climatique des émissions de méthane au niveau mondial est massif : la dernière édition du Global Methane Budget (GMB)³⁴ publiée en 2024 met en évidence que la contribution du méthane au réchauffement climatique est de +0,5 °C depuis l'ère préindustrielle, à comparer à +0,8 °C pour le CO₂, et la tendance n'est guère rassurante puisque « la concentration de méthane dans l'atmosphère durant la dernière décennie, comme d'ailleurs celles des principaux GES, suit les tendances des trajectoires représentatives les plus pessimistes analysées par le GIEC ».

Par ailleurs, il s'avère que **les options de réduction des émissions de méthane font partie de celles présentant les coûts d'abattement les plus faibles**, parfois même négatifs **comme l'illustre le graphique ci-dessous** :

³² Allen, M., Fuglestedt, J., Shine, K. et al. New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Clim Change* 6, 773–776 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate2998>

³³ Cain, M., Lynch, J., Allen, M.R. et al. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *npj Clim Atmos Sci* 2, 29 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4>

³⁴ <https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/>

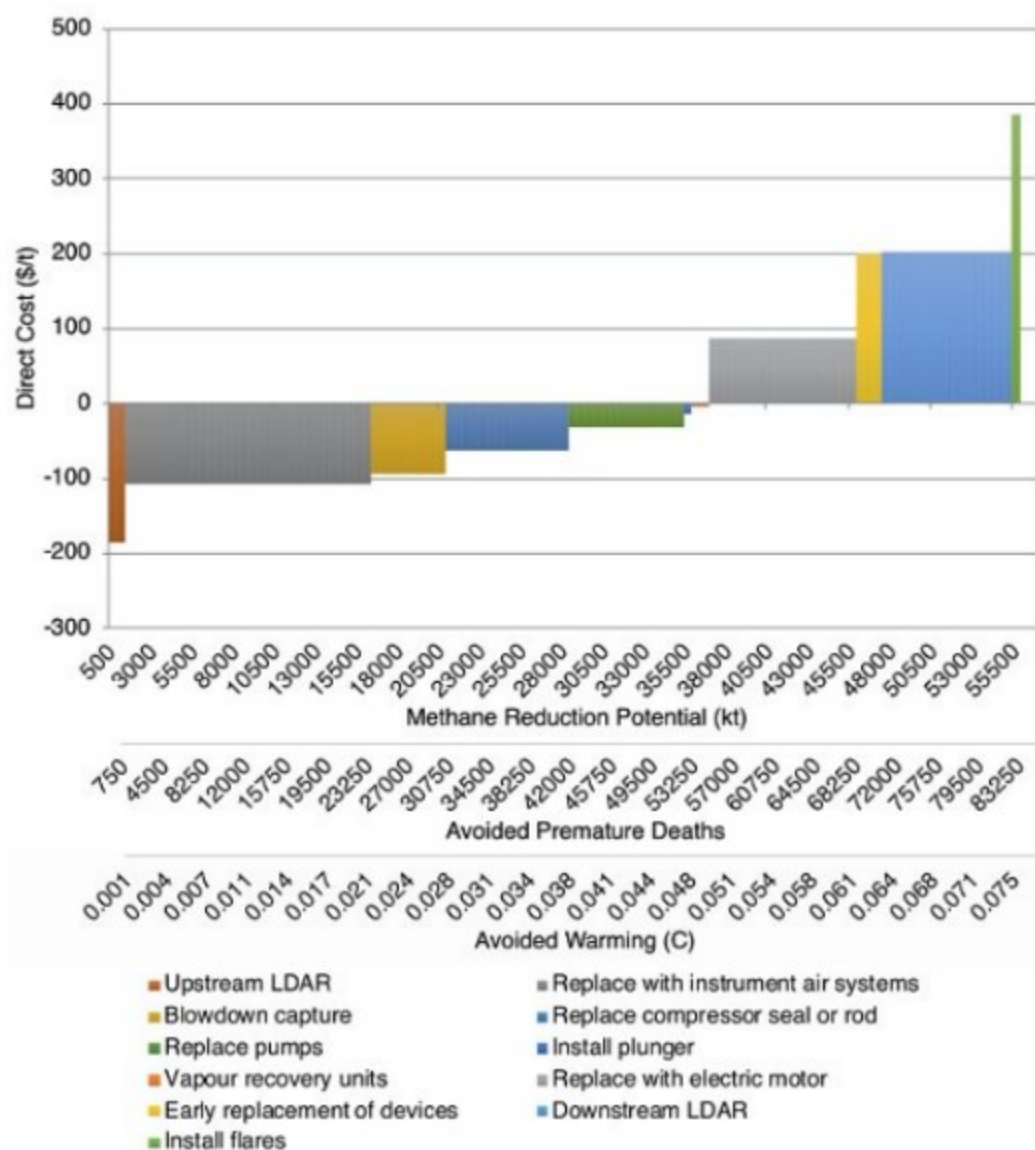


Figure 4.12 Relative savings/costs (2018 US\$ per tonne) of targeted methane abatement measures in the oil and gas sector identified by the IEA showing the reduction potential, '000 tonnes; impacts on premature deaths and global mean surface temperature, degrees Centigrade

Source : Global methane assessment - Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions (2021)³⁵

Ce gaz ayant un pouvoir radiatif très fort, une accélération de la réduction de ses émissions constituerait un « quick-win » pour le climat. Cela pourrait également contribuer à limiter les risques de dépassement (même temporaire) des objectifs de l'Accord de Paris, à condition que cette intensification des efforts sur le méthane ne conduise pas en parallèle à une réduction des efforts sur le CO₂.

Recommandation n° 4. [MASA, MEFSIN, MTE, MAE] Intensifier les efforts de réduction des émissions de méthane.

³⁵ https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2021_Global-Methane_Assessment_full_0.pdf

3 NOTRE CONNAISSANCE DES POINTS DE BASCULE³⁶ DOIT-ELLE CONDUIRE A ACCELERER LA DECARBONATION ET A FIXER DES TAUX D'ACTUALISATION ELEVES ?

Dans les années 1970, **Morton Grodzins** a introduit le concept de « tipping point » dans le domaine des sciences sociales pour décrire des seuils critiques dans les dynamiques de ségrégation urbaine. La notion a ensuite été appliquée aux systèmes naturels dans les années 1980 et 1990.

La première définition scientifique des points de bascule date de 2001. Pour le climatologue Hans Joachim Schellnhuber, c'est un seuil critique au-delà duquel un système climatique bascule vers un état radicalement différent et souvent irréversible.

Les travaux du **GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)** ont abordé pour la première fois la notion de points de bascule dans le **Rapport spécial sur les scénarios climatiques (2001)** et l'ont approfondie dans le **4^{ème} rapport d'évaluation (2007)**. Sont ainsi décrits les risques associés aux seuils critiques des systèmes terrestres.

Une définition « officielle » des points de bascule est communiquée dans le résumé à l'intention des décideurs du Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre (2018) :

« Point de bascule – Tipping point : degré de changement des propriétés d'un système au-delà duquel le système en question se réorganise, souvent de façon abrupte, et ne retrouve pas son état initial même si les facteurs du changement sont éliminés. En ce qui concerne le système climatique, le point de bascule fait référence à un seuil critique au-delà duquel le climat mondial ou un climat régional passe d'un état stable à un autre état stable »³⁷.

C'est sur la base de cette définition que la mission parlera par la suite de points de bascule. Un climatologue rencontré par la mission a souligné que le réchauffement climatique se traduit également par de très nombreux « points de bascule locaux » pour les individus ou groupes d'individus. Sécheresses locales, pénurie d'eau, phénomènes extrêmes (typhons, feux de forêts...) en constituent d'ores et déjà autant d'exemples.

Le réchauffement de l'atmosphère par rapport à la période pré industrielle, estimé à +1,1 °C, n'a pas encore conduit à une modification sensible des équilibres entre les différents systèmes qui déterminent le climat (courants marins, courants aériens, glaciers, forêts...)³⁸. Certains de ces systèmes exposés au risque de basculement sont qualifiés de « globaux » parce qu'ils jouent un rôle majeur dans

³⁶ Voir annexe 9

³⁷ [SR15_Summary_Volume_french.pdf](#)

³⁸ La paléoclimatologie confirme que sur longue période, le climat terrestre peut être fortement affecté par des facteurs externes à la planète comme variations à long terme (ou *séculaires*) des paramètres de l'orbite et de la rotation terrestre ([Cycles de Milankovitch et variations climatiques : dernières nouvelles — Planet-Terre](#)).

le fonctionnement du système terrestre. D'autres, sans être globaux, peuvent être essentiels au bien-être humain ou être précieux compte-tenu des services uniques qu'ils rendent au système terrestre.

3.1 La communauté scientifique a identifié un certain nombre de points de bascule

Le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** a traité des points de bascule climatiques dans plusieurs de ses rapports, et en particulier dans :

1. Rapport Spécial sur le Réchauffement Planétaire de 1,5 °C (SR15) - 2018 :

Le GIEC y souligne que limiter le réchauffement à 1,5 °C réduirait les risques de franchir certains points de bascule, comparativement à un réchauffement de 2 °C ou plus.

2. Rapport Spécial sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat en Évolution (SROCC) - 2019 :

Ce rapport analyse les risques de franchissement de points de bascule liés à la fonte des glaces et à l'élévation du niveau de la mer, ainsi que leurs implications pour les écosystèmes marins et côtiers.

3. Sixième Rapport d'Évaluation (AR6) - 2021/2022 :

- **Groupe de travail I :** Dans le volume intitulé « *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* », le GIEC discute des points de bascule, notamment en ce qui concerne la calotte glaciaire du Groenland, la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (AMOC) et d'autres composantes critiques du système climatique.
- **Groupe de travail II :** Le rapport « *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* » examine les impacts potentiels des points de bascule sur les écosystèmes et les sociétés humaines.

D'autres études et rapports constituent des références utiles :

- **Étude de Lenton et al. (2008) :**

Dans l'article intitulé « *Tipping elements in the Earth's climate system* », publié dans *Proceedings of the National Academy of Sciences*, les auteurs identifient et analysent plusieurs éléments du système climatique susceptibles de basculer de manière abrupte.

- **Étude de Armstrong McKay et al. (2022) :**

Cette recherche récente, qui a donné lieu à l'article « *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points* » dans *Science*, met à jour l'état des connaissances sur les points de bascule climatiques et leurs impacts potentiels, identifiant notamment des seuils critiques pour la calotte glaciaire du Groenland, les récifs coralliens tropicaux et le pergélisol.

Les analyses diffèrent selon les rapports et les études sur plusieurs aspects :

1. Le nombre de systèmes identifiés comme susceptibles de basculer.
2. Les seuils de température nécessaires pour déclencher ces bascules.
3. Le temps restant avant que ces seuils ne soient atteints.
4. La durée de transition vers un nouvel état après le franchissement du seuil.

Le tableau qui suit synthétise les principaux enseignements de ces rapports.

Aspect analysé	Rapport SR15 (2018)	SROCC (2019)	AR6 (2021/2022)	Étude de Lenton et al. (2008)	Armstrong McKay et al. (2022)
1. Nombre de systèmes climatiques identifiés	7 (ex. Groenland, AMOC, pergélisol)	9 (ajout des glaciers de montagne)	10+ (ajout de systèmes régionaux)	9 (systèmes globaux uniquement)	16 (inclut des systèmes régionaux)
2. Seuils de température	Majorité des bascules à +1,5 °C à +2 °C	Risques amplifiés au-delà de +2 °C	Certains risques dès +1,5 °C, aggravés à +2 °C	Entre +1 °C et +3 °C selon les systèmes	Certains seuils dès +1 °C ; plusieurs à +1,5 °C
3. Années avant atteinte des seuils	Décennies à quelques siècles	Moins d'un siècle pour la plupart	10-50 ans pour plusieurs systèmes clés	Entre 50 et 300 ans selon le système	Décennies pour des bascules rapides (ex. AMOC)
4. Durée de transition vers un nouvel état	Variable : de quelques décennies à millénaires	Jusqu'à 1000 ans (ex. calotte glaciaire)	Plusieurs siècles pour les glaces ; des décennies pour l'AMOC	Décennies (AMOC) à plusieurs siècles (glaces)	Durées similaires à AR6, mais avec incertitudes

Source : mission

Chaque rapport comporte des points clés qui peuvent contribuer à les distinguer :

1. **Nombre de systèmes identifiés** : Les études récentes (Armstrong McKay et al., AR6) incluent un plus grand nombre de systèmes régionaux, comme les récifs coralliens ou les forêts boréales, en plus des systèmes globaux.
2. **Seuils de température** : Le rapport SR15 met en garde contre les risques accrus entre +1,5 °C et +2 °C, mais les travaux récents montrent que certains points de bascule (ex. récifs coralliens) pourraient être franchis dès +1 °C. Les grands systèmes comme l'AMOC et le Groenland semblent davantage menacés à partir de +1,5 °C à +2 °C.
3. **Années avant atteinte des seuils** : Les modèles récents prévoient que certains points de bascule (ex. AMOC) pourraient être atteints dans les prochaines décennies selon la trajectoire de réchauffement actuelle. Pour d'autres systèmes, comme les calottes glaciaires, le processus pourrait prendre plusieurs siècles, voire ne jamais être déclenché, en particulier si les objectifs de l'Accord de Paris sont respectés.
4. **Durée de transition vers un nouvel état** : Certains changements, comme l'effondrement de l'AMOC, pourraient se produire en quelques décennies, tandis que la perte totale des calottes glaciaires pourrait prendre plusieurs siècles voire millénaires.

Les rapports du GIEC et les études scientifiques convergent sur l'importance de limiter le réchauffement pour réduire les risques de franchir des points de bascule climatiques. Toutefois, les travaux les plus récents (Armstrong McKay et al., AR6) montrent que certains seuils pourraient être atteints plus rapidement et à des niveaux de réchauffement plus faibles que prévu.

C'est l'étude **Armstrong McKay et al. (2022)** qui a été choisie pour présenter, dans le présent rapport, les points de bascule et à laquelle on se réfère dans la suite.

Tableau présentant les seuils de déclenchement, les échelles temporelles et les impacts estimés des points de bascule globaux et régionaux

Category	Proposed climate tipping element (and tipping point)	Threshold (°C)			Timescale (years)			Maximum impact* (°C)		
		Est.	Min	Max	Est.	Min	Max	Global	Region	
Global core tipping elements	GrIS	Greenland Ice Sheet (collapse)	1.5	0.8	3.0	10k	1k	15k	0.13	0.5 to 3.0
	WAIS	West Antarctic Ice Sheet (collapse)	1.5	1.0	3.0	2k	500	13k	0.05	1.0
	LABC	Labrador-Irminger Seas / SPG Convection (collapse)	1.8	1.1	3.8	10	5	50	-0.50	-3.0
	EASB	East Antarctic Subglacial Basins (collapse)	3.0	2.0	6.0	2k	500	10k	0.05	?
	AMAZ	Amazon Rainforest (dieback)	3.5	2.0	6.0	100	50	200	Partial: 30 GtC / 0.1°C Total: 75 GtC / 0.2°C	0.4 to 2.0
	PFTP	Boreal Permafrost (collapse)	4.0	3.0	6.0	50	10	300	125-250 GtC / 175-350 GtCe / 0.2-0.4°C	~
	AMOC	Atlantic M.O. Circulation (collapse)	4.0	1.4	8.0	50	15	300	-0.50	-4 to -10
	AWSI	Arctic Winter Sea Ice (collapse)	6.3	4.5	8.7	20	10	100	0.60	0.6 to 1.2
	EAIS	East Antarctic Ice Sheet (collapse)	7.5	5.0	10.0	?	10k	?	0.60	2.0
	REEF	Low-latitude Coral Reefs (die-off)	1.5	1.0	2.0	10	~	~	~	~
Regional impact tipping elements	PFAT	Boreal Permafrost (abrupt thaw)	1.5	1.0	2.3	200	100	300	Abrupt thaw adds 50% to gradual: 10 GtC/1.4 GtCe/ .04°C per °C @2100; 25 GtC/3.5 GtCe/ .11°C per °C @2300	~
	BARI	Barents Sea Ice (abrupt loss)	1.6	1.5	1.7	25	?	?	~	+
	GLCR	Mountain Glaciers (loss)	2.0	1.5	3.0	200	50	1k	0.08	+
	SAHL	Sahel and W. African Monsoon (greening)	2.8	2.0	3.5	50	10	500	~	+
	BORF	Boreal Forest (southern dieback)	4.0	1.4	5.0	100	50	?	+52GtC / net -0.18°C	-0.5 to -2
	TUND	Boreal Forest (northern expansion)	4.0	1.5	7.2	100	40	?	-6 GtC / net +0.14°C	0.5-1.0

Source : article d'Armstrong McKay et al. publié dans Science (09/09/2022) : "[Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points | Science](#)"

Le tableau ci-dessus montre que pour 5 des points de bascule, l'extrémité basse de la fourchette de hausse des températures qui pourrait conduire à leur déclenchement est inférieure à +1,1°C. Le déclenchement des premières bascules pourrait être proche. Ces 5 points de bascule sont :

Points de bascule à impact global

- la couverture glaciaire du Groënland +0,8 °C
- la partie Ouest de la calotte glaciaire de l'Antarctique..... +1 °C
- mouvement de convection du Labrador³⁹ et de la mer d'Irminger +1,1 °C

Points de bascule à impact régional

- blanchiment des récifs coraliens⁴⁰ +1 °C
- dégel du permafrost +1 °C

Dans la fourchette qui définit les limites de l'augmentation de la température moyenne telles que les fixe l'Accord de Paris (entre 1,5 et 2 °C), 6 points de bascule supplémentaires pourraient voir leur fourchette basse de plage de température de déclenchement dépassée : dépérissement de la forêt amazonienne, disparition des bassins sub-glaciaires de l'Antarctique Est, fonte de la banquise de la mer de Barents, fonte des glaciers montagneux, évolution de la forêt boréale (dépérissement au sud, extension au nord), modification du régime des moussons.

3.2 L'échéance de survenue et l'impact de ces points de bascules sont très variés

3.2.1 Le franchissement du seuil de déclenchement de points de bascule n'entraînerait de dommages massifs que s'il concernait deux systèmes climatiques bien identifiés : la disparition de la banquise et celle de la calotte glaciaire antarctique.

La lecture du tableau ci-dessus, extrait de l'article de Armstrong McKay et al. (2022), confirme que l'impact de chacun des points de bascule apprécié par sa contribution additionnelle au réchauffement climatique n'est massif⁴¹ que pour deux d'entre d'eux.

L'océan glacial arctique est couvert d'une couche de glace qui atteint son extension maximale en hiver. Depuis plusieurs années la banquise (artic winter sea ice) diminue en épaisseur et surface. Même si l'évolution semble s'accélérer sous l'influence d'une pénétration accrue du rayonnement solaire, la banquise ne va pas disparaître complètement. Elle se reconstitue l'hiver même si c'est à une échelle réduite⁴². Dans ces conditions, l'impact estimé du franchissement du point de bascule conduisant à sa disparition (+0,60 °C) n'est pas pour demain : l'élévation minimale de température qui déclencherait la bascule est estimée à +4,5 °C.

³⁹ La Mer du Labrador, au sud-ouest du Groenland, est une des régions de convection de l'Atlantique Nord où la formation d'eau profonde alimente un système de courants à grande échelle, la circulation océanique méridienne de retournement Atlantique, autrement connue comme AMOC ou circulation thermohaline. Avec l'AMOC, les courants océaniques en surface apportent les eaux subtropicales chaudes vers l'Atlantique Nord où, leur refroidissement les fait plonger en profondeur dans les régions de convection. Ils retournent ainsi vers sud. Ce système est donc responsable d'un transport de chaleur nette vers l'Atlantique du Nord.

⁴⁰ "under the RCP8.5 climate change scenario, the global suitability for coral reefs may increase up to 16 % by 2100, mostly due to improved suitability of higher latitudes. In contrast, in its current range, coral reef suitability may decrease up to 46 % by 2100". ([Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change- fdi:010064719- Horizon](#))

⁴¹ C'est-à-dire avec un impact sur la hausse de la température moyenne globale de la planète supérieur à 0,15 °C.

⁴² La NASA fournit des images satellite qui permettent de suivre les variations de surface de la banquise [World of Change: Arctic Sea Ice](#)

L'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique oriental porte un potentiel de réchauffement de la température moyenne (+0,60 °C) équivalent à celui de la disparition de la banquise qui couvre l'océan glacial arctique. Le seuil de déclenchement reste toutefois suffisamment élevé pour ne pas craindre à brève échéance les conséquences de la réalisation de ce point de bascule (estimé entre +5 °C et +10 °C).

A la différence de la disparition de la banquise, l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique oriental entraînerait une élévation du niveau de la mer. En fonction de l'ampleur de cet effondrement⁴³ la montée des eaux des océans pourrait infliger des dommages considérables dont on prend la mesure par exemple en recensant les infrastructures exposées au risque de submersion comme les ports et aéroports mais aussi les grandes villes côtières et les îles⁴⁴.

Il est intéressant de noter que deux autres points de bascule engendreraient des impacts d'une intensité équivalente, mais ayant pour conséquence un refroidissement de la température moyenne de la planète : arrêt du mouvement de convection du Labrador et de la mer d'Irminger (-0,50 °C) et arrêt de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique⁴⁵ (-0,50 °C).

Il ne faut donc pas attendre dans les prochaines années ou dizaines d'années de modification significative de la température moyenne de la planète liée à ces points de bascule climatiques.

3.2.2 Le calendrier de déclenchement des points de bascule comme la durée de réalisation du changement d'état du système climatique concerné sont incertains

Si les dommages qui résulteraient de l'atteinte d'une certaine élévation de la température moyenne font l'objet d'évaluations relativement robustes, ce n'est pas le cas des deux autres variables (plage de température de déclenchement, durée de la phase d'enclenchement de la bascule) qui déterminent l'imminence d'une bifurcation d'un système climatique et incidemment la réponse qu'il faut adopter face à ce risque :

- La plage des seuils de températures dont le franchissement est susceptible de déclencher le point de bascule est large.

Pour tous les points de bascule dits « globaux », à l'exception de celui qui concerne les récifs coralliens, le seuil de déclenchement estimé comme probable est supérieur à +1,5 °C. L'incertitude qui entoure le seuil de déclenchement est importante puisque les plages de températures où ces points de bascule devraient se déclencher sont d'une amplitude comprise entre 2 °C et 7,6 °C (sauf pour les récifs coralliens où l'amplitude de la plage de température de déclenchement est de 1 °C).

⁴³ "If Totten Glacier were to collapse completely, global sea levels would rise by at least 11 feet (3.3 meters). As in the West Antarctic Ice Sheet, complete collapse of Totten Glacier may take centuries, although the timing of retreat in both places is the subject of intensive research." ([Study sees new threat to East Antarctic ice - NASA Science](#))

⁴⁴ Un pic de réchauffement planétaire de l'ordre de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C, 4 °C conduirait respectivement à une montée du niveau de la mer de l'ordre de 2 à 3 m, 2 à 6 m, 4 à 10 m et 12 à 16 m au bout de 2 000 ans, et davantage au bout de 10 000 ans. Ces projections plurimillénaires sont cohérentes avec les niveaux atteints lors des périodes climatiques chaudes du passé.

Source : [Augmentation du niveau marin et ses conséquences sur les risques littoraux - Avis de l'Académie des technologies du 15 mai 2024](#)

⁴⁵ AMOC

Il est donc très probable que la très grande majorité de ces bascules ne se produisent qu'à long terme dans le processus de réchauffement de la planète.

- Il s'avère difficile d'évaluer la durée que mettra le système climatique pour franchir le seuil de déclenchement d'un point de bascule et cette durée peut varier de quelques dizaines à quelques milliers d'années selon le point de bascule considéré.

Des échanges avec les climatologues rencontrés par la mission, il ressort que la notion de point de bascule peut conduire à une mauvaise compréhension d'un changement d'état qui peut intervenir sur une période de temps relativement longue. Le pas de temps de l'évolution du climat n'est pas celui de l'homme et le franchissement d'un seuil entraîne plus un changement de pente qu'une cassure.

Si trois points de bascule sont identifiés comme susceptibles d'être atteints dans les 20 prochaines années (disparition du courant du Labrador, de la mer d'Irminger et des gyres subpolaires⁴⁶), disparition de la banquise polaire, perte des récifs coraliens), seul le premier mérite une attention particulière dans la mesure où la lecture du tableau ci-dessus montre que :

- l'élévation de la température moyenne de surface (+1,1 °C) a **déjà atteint** le seuil bas de la fourchette de déclenchement pour ce point de bascule (courant du Labrador / mer d'Irminger / gyres Subpolaires) ;
- le déclenchement pourrait intervenir dans une plage de temps resserrée avec une possibilité qu'il apparaisse **d'ici 2030** ;
- En l'occurrence, il est censé avoir un impact de **refroidissement planétaire (-0,50 °C)**.

Ainsi, selon les climatologues rencontrés par la mission, le principal enjeu reste d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris et la neutralité carbone en Europe d'ici 2050.

3.2.3 La communauté scientifique s'inquiète de la potentielle utilisation du renforcement du sentiment d'urgence généré par les points de bascules climatiques pour promouvoir l'utilisation de la géo-ingénierie

Certains courants ont tendance à utiliser de façon biaisée les points de bascule comme un argument pour expliquer que les menaces sur la planète sont à court terme et nécessitent de tenter le « tout pour le tout » en recourant à des techniques audacieuses, notamment de géo-ingénierie. Les deux grandes familles de la géo-ingénierie regroupent des techniques et pratiques diversifiées :

- l'extraction du CO₂ présent dans l'atmosphère (« carbon dioxide removal », ou CDR). Pour l'instant seuls les puits de carbone naturels et en particulier les forêts sont considérées comme susceptibles d'apporter une contribution significative à la capture / séquestration du CO₂. Les modèles de simulation de l'évolution du climat commencent à intégrer cette contribution.

⁴⁶ Un gyre océanique est un gigantesque tourbillon d'eau océanique formé d'un ensemble de courants marins.

Celle-ci est présentée comme significative par des institutions comme la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO)⁴⁷.

- la modification du bilan radiatif, souvent assimilée à une modification du rayonnement solaire (« solar radiation management », ou SRM), cherche à compenser l'augmentation de la température moyenne globale par une diminution du rayonnement absorbé par la Terre (GIEC, 2022, 168). La géo-ingénierie envisage de recourir à des **dispositifs techniques et/ou chimiques dans les nuages, dans l'atmosphère, ou dans l'espace**. C'est le cas de **l'injection d'aérosols dans la stratosphère** (*stratospheric aerosol injection, SAI*), **l'éclaircissement des nuages marins** (*marine cloud brightening, MCB*), **l'amincissement des cirrus** (*cirrus cloud thinning, CCT*) ou encore **l'installation de miroirs dans l'espace** (*space sunshades*).

Ces deux options envisagées présentent un même risque : celui d'encourager autant que de permettre un relâchement de l'effort de décarbonation. Elles se différencient toutefois en cela que la seconde présente des risques physiques beaucoup plus importants en supposant le recours à des technologies pour l'instant non maîtrisées⁴⁸. **Ces technologies ne semblent pas en mesure d'apporter de solutions dans un calendrier compatible avec l'urgence climatique, la nécessité de mobiliser les ressources et de concentrer les efforts sur l'atteinte de l'objectif de 1,5 °C.**

4 DANS CERTAINS CAS, LA PRISE EN COMPTE DU TEMPS PEUT ETRE UTILE POUR DES DECISIONS DE POLITIQUE PUBLIQUE

Même si, comme on l'a vu dans la partie 3, les points de bascule ne sont pas une raison suffisante pour modifier les trajectoires de réduction des émissions de gaz à effet de serre, il n'en reste pas moins qu'il reste préférable d'éviter une émission plus tôt que plus tard, et que c'est une bonne chose que de prendre en compte cette différence dans les politiques publiques.

Les politiques publiques se basent notamment sur l'utilisation des données environnementales, qui doivent être définies et mesurées avec pertinence. Parmi les outils permettant de qualifier les données, les analyses du cycle de vie (ACV) se sont particulièrement développées, dans l'objectif d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou service tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la gestion de la fin de vie. Ceci comprend particulièrement, mais pas seulement, l'évaluation de l'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Celui-ci consiste à prendre en compte le cumul des émissions sur toute la durée de vie, année après année. Se pose donc la question de la manière dont on prend en compte les différentes années : faut-il additionner simplement les émissions ou les pondérer ? Faut-il utiliser un coefficient d'actualisation ?

La mission a examiné particulièrement le principal (ou seul ?) exemple de ce type : la prise en compte de la temporalité dans la réglementation environnementale RE 2020.

⁴⁷ [Forest-based adaptation: transformational adaptation through forests and trees](#)

⁴⁸ Voir le rapport de décembre 2024 du « Scientific Advice Mechanism » intitulé « Solar Radiation Modification » : <https://scientificadvice.eu/advice/solar-radiation-modification/>

4.1 Un exemple d'ACV dynamique : la RE 2020

Depuis de nombreuses années, la France s'est dotée d'une réglementation thermique (RT) pour s'assurer que chaque construction neuve respecte un certain niveau de performance énergétique : on a ainsi eu successivement la RT 2000, la RT 2005 et la RT 2012.

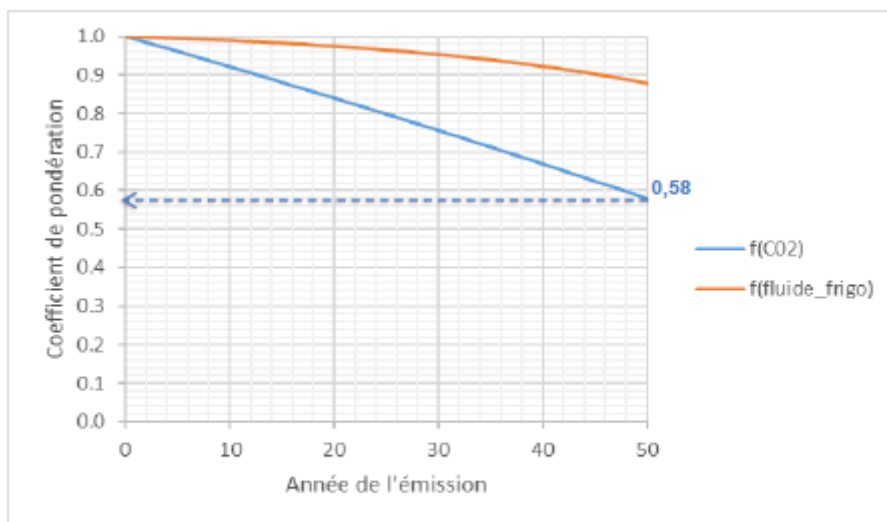
La dernière réglementation, la Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020) a été introduite pour répondre à des enjeux environnementaux et énergétiques croissants, avec des objectifs ambitieux pour la construction de bâtiments neufs :

- sobriété énergétique : réduction des consommations d'énergie primaire de 15 à 20 % par rapport à la RT 2012 ;
- impact carbone : diminution des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, en intégrant des exigences sur les matériaux de construction et les équipements ;
- confort estival : amélioration du confort en période de forte chaleur, avec un nouvel indicateur de Degrés-Heures (DH) pour évaluer l'inconfort estival ;
- à partir de 2025, la RE 2020 prévoit une interdiction progressive des énergies fossiles pour le chauffage des nouveaux bâtiments. Les solutions de chauffage devront privilégier les énergies renouvelables, comme les pompes à chaleur.

La loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte encourageait l'utilisation de matériaux biosourcés pour réduire l'empreinte environnementale et favoriser le stockage de carbone. La loi « climat et résilience » du 22 août 2021 est allée plus loin en prévoyant notamment dans son article 52 un rapport évaluant les modalités de financement des paiements pour services environnementaux ainsi que leur impact potentiel sur la préservation des écosystèmes forestiers, en particulier pour le stockage du carbone.

Suite à ces textes, et également pour décliner la SNBC, un groupe de travail a été mis en place pour examiner comment prendre en compte la capacité de certains matériaux de construction à stocker le carbone sur un temps long. Le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), l'institut technologique chargé des secteurs de la forêt, de la cellulose, du bois-construction et de l'ameublement (FCBA), le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) et les acteurs privés ont contribué à ces travaux, qui ont abouti à la première prise en compte d'ACV dynamique (c'est-à-dire prenant en considération la cinétique des émissions de GES) dans la réglementation française.

Concrètement, pour la première fois, des coefficients de pondération sont introduits pour prendre en compte la temporalité des émissions de gaz à effet de serre :



Au départ : Potentiel réchauffement climatique x1
A 50 ans : Potentiel réchauffement climatique x0,578 pour CO₂

Source : CEREMA

Ainsi, les émissions dans 50 ans sont affectées d'un coefficient de pondération de 0,578 par rapport aux émissions de cette année.

Le calcul de ce coefficient est basé sur l'application de la « **formule de Berne** »⁴⁹ qui modélise la décroissance de la concentration d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère suite à son émission, par l'effet conjugué des absorptions par les différents puits de carbone naturels (océan, biomasse, sol). Schématiquement, on en déduit que l'effet sur le réchauffement climatique de l'émission d'une tonne de CO₂ décroît avec le temps parallèlement à la baisse de sa concentration dans l'atmosphère.

⁴⁹ Issue des travaux de l'Université de Berne et particulièrement sur les développements de l'article « Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics : a multi-model analysis » par F. Joos, R. Roth, J. S. Fuglestad, G. P. Peters, I. G. Enting, W. von Bloh, V. Brovkin, E. J. Burke, M. Eby, N. R. Edwards, T. Friedrich, T. L. Frölicher, P. R. Halloran, P. B. Holden, C. Jones, T. Kleinen, F. T. Mackenzie, K. Matsumoto, M. Meinshausen, G.-K. Plattner, A. Reisinger, J. Segschneider, G. Shaffer, M. Steinacher, K. Strassmann, K. Tanaka, A. Timmermann, and A. J. Weaver. <https://acp.copernicus.org/articles/13/2793/2013/>

Encadré : La formule de Berne et ses implications sur le cycle du carbone

Le pouvoir radiatif d'une tonne de CO₂ émise dans l'atmosphère diminue progressivement en raison des processus naturels de captation et de recyclage du carbone :

- absorption par les océans (environ 30 % de la tonne dans les premières décennies), grâce à la dissolution du CO₂ dans l'eau ;
- séquestration par la biosphère terrestre (forêts, sols), qui capte une partie du CO₂ via la photosynthèse et la croissance végétale.

On calcule ainsi la fraction de masse résiduelle de CO₂ dans l'atmosphère après une émission initiale d'une tonne :

$$r(t) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

- a_0 : fraction qui reste in fine dans l'atmosphère.
- a_i (pour i compris entre 1 et 3) : fractions absorbées respectivement par les différents puits de carbone naturels (sols, biosphère, océans) qui participent à la dynamique du CO₂.
- τ_i : temps caractéristiques associés aux échanges avec ces compartiments.
- t : temps écoulé (en années).

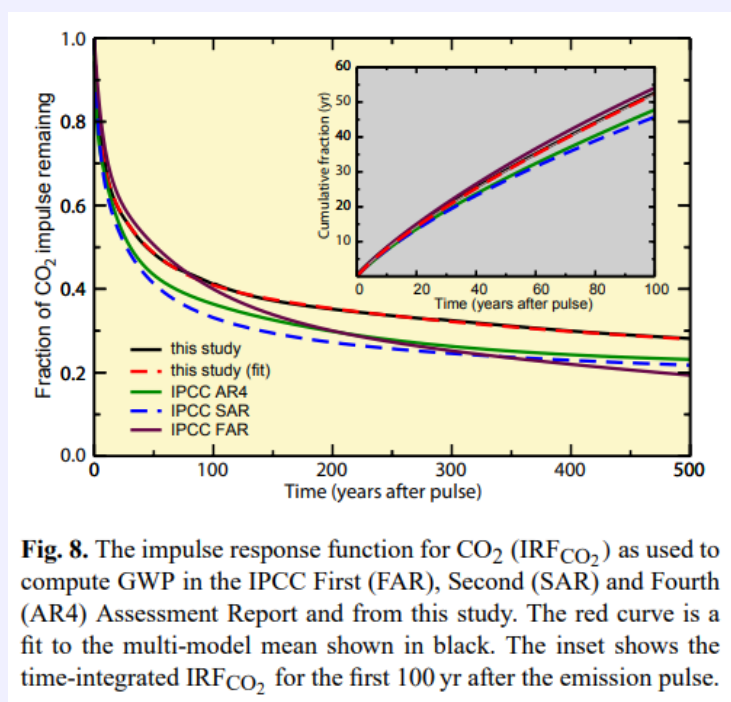


Fig. 8. The impulse response function for CO₂ (IRF_{CO2}) as used to compute GWP in the IPCC First (FAR), Second (SAR) and Fourth (AR4) Assessment Report and from this study. The red curve is a fit to the multi-model mean shown in black. The inset shows the time-integrated IRF_{CO2} for the first 100 yr after the emission pulse.

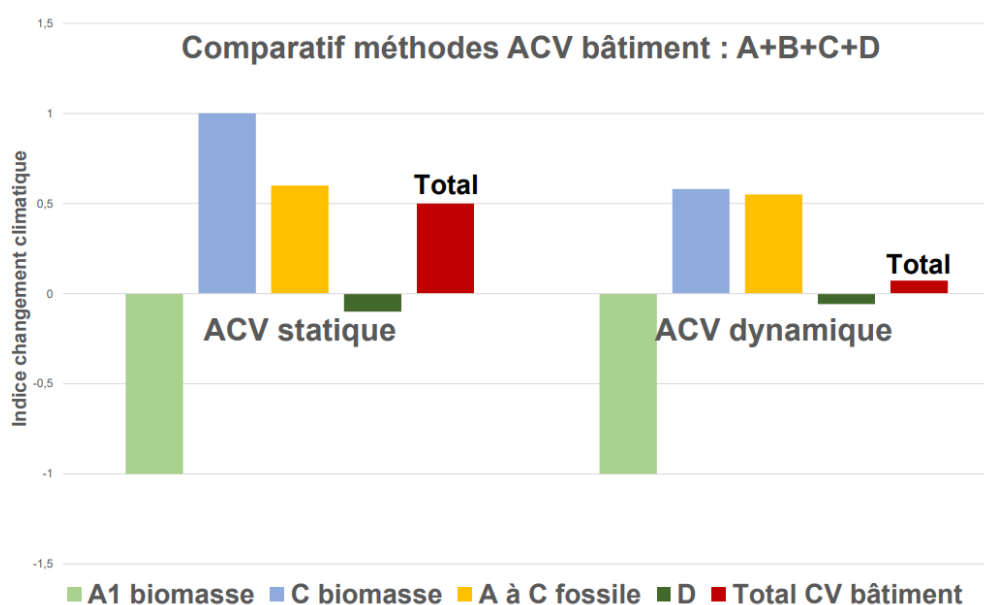
Source : <https://acp.copernicus.org/articles/13/2793/2013/>

Le rythme de réduction est initialement rapide : environ 50 % du CO₂ émis est absorbé dans les premières décennies. Ensuite, cela diminue beaucoup plus lentement :

- après 100 ans, environ 20 % de la tonne de CO₂ reste dans l'atmosphère ;
- après plusieurs milliers d'années, une fraction (estimée à 10-15 %) persiste en raison de l'équilibre lent entre l'atmosphère, les océans profonds, et les réservoirs géologiques.

Les normes sur lesquelles s'appuie la RE 2020 recommandent de réaliser l'ACV sur une période de 100 ans et de considérer que la durée de vie d'un bâtiment est de 50 ans⁵⁰. Ainsi, mécaniquement, plus une tonne de CO₂ est émise tardivement, moins son impact pendant le reste de la fenêtre d'analyse est conséquent. Cet impact, dont le cumul est calculé jusqu'à une date fixe (100 ans après le début de la construction), quelle que soit l'année d'émission, est appelé pouvoir de réchauffement global ajusté. Le coefficient de pondération utilisé dans la RE 2020 se calcule pour l'année n comme le ratio entre le PRG ajusté d'une tonne de CO₂ en année n par le PRG ajusté d'une tonne de CO₂ en année 1.

Le graphique suivant illustre comment le passage d'une ACV statique à une ACV dynamique permet de vérifier que « l'indice de changement climatique » d'un produit bois est significativement réduit par rapport à son calcul en ACV statique. L'écart provient essentiellement de la phase de « fin de vie »⁵¹ où l'émission de GES du bois-construction s'opère par son brûlage. La prise en compte du décalage temporel entre la construction et la fin de vie du bâtiment génère cet écart.



Source : présentation à l'occasion de la Séance publique de l'Académie d'Agriculture de France 9 juin 2021⁵²

La RE 2020 vient ainsi illustrer l'intérêt d'incorporer des matériaux biosourcés le plus tôt possible dans les constructions neuves. Elle présente donc l'avantage de prendre en compte la temporalité des émissions et en particulier le stockage de carbone sur une longue durée que permet l'usage de matériaux biosourcés.

La mission s'est interrogée sur la possibilité et l'opportunité de généraliser l'usage de calculs d'ACV dynamiques à d'autres produits.

⁵⁰ Pour l'ACV sur 100 ans : normes ISO 21930 et EN 15804+A2 ; pour la durée de vie des bâtiments de 50 ans : norme EN 15978.

⁵¹ A : phase de construction ; B : phase d'utilisation ; C : phase de fin de vie ; D : phase de recyclage.

⁵² Les atouts et points de vigilance pour les produits bois dans l'ACV dynamique du bâtiment G. Deroubaix, E. Vial – FCBA : https://www.academie-agriculture.fr/system/files_force/seances-colloques/20210609presentation2.pdf?download=1

4.2 Les limites de l'ACV dynamique dans la RE 2020

L'examen attentif des modalités de mise en œuvre met en fait en évidence un certain nombre de difficultés ou de limites.

D'une part, lorsque la construction d'un immeuble incorpore un matériau biosourcé (bois) plutôt qu'un matériau très carboné (béton par exemple), le différentiel d'émissions entre les deux scénarios prend notamment en compte le fait que le bois utilisé permet de « stocker » le carbone pendant sa durée de vie, ce qui apporte donc un gain par rapport à l'utilisation du béton. L'hypothèse sous-jacente est que les arbres qui ont été utilisés pour ces matériaux de construction ont été remplacés par d'autres qui ont la même capacité d'absorption de GES ; or cette hypothèse ne tient compte ni du décalage dans le temps lié au temps de pousse des nouveaux arbres, ni de la baisse de capacité de stockage des forêts liée au changement climatique (sécheresses, maladies, évolution des essences...).

De façon plus générale, une ACV dynamique devrait prendre en compte la temporalité pour l'ensemble des émissions, ce qui nécessite des données sur l'ensemble des facteurs d'émissions à intégrer. Or ces données ne sont pas suffisamment disponibles.

D'autres interrogations portent sur l'utilisation du PRG ajusté, avec les notions de cumul d'impact ou de pics de température (cf. par exemple thèse de Koji Neshigi⁵³). Comme le CSTB l'a indiqué à la mission, le PRG ajusté ne peut en aucun cas se sommer avec le PRG normal. Le choix de l'horizon temporel pour le PRG et la durée de vie des GES produisent une incohérence de l'interprétation de l'impact de changement climatique (e.g., Levasseur 2010, Frischknecht et al. 2016).

De façon générale, si la RE 2020 a le grand mérite de mettre en œuvre pour la première fois une ACV dynamique, les travaux scientifiques sur le sujet doivent se poursuivre.

4.3 Les ACV dynamiques n'ont de sens que pour des produits à longue durée de vie

Compte-tenu de la complexité de leur mise en œuvre, les ACV dynamiques n'ont de sens que pour des objets dont la durée de vie est suffisamment longue. En effet, si la méthode n'apporte pas de conclusions significativement plus robustes sur les politiques publiques à mettre en œuvre que les méthodes d'analyse plus simples actuellement utilisées, le surcoût induit par les complexités de l'ACV dynamique est alors dissuasif. Comme l'actualisation ne commence à produire des effets sur les conclusions qu'à moyen-long terme, un ordre de grandeur d'une dizaine d'années paraît raisonnable pour justifier du recours à cette méthode. C'est bien sûr le cas avec des bâtiments, dont la durée de vie peut atteindre des dizaines ou centaines d'années.

Sur cette base, deux autres types d'objets ont retenu l'attention de la mission : les véhicules et le bois (pour lequel l'usage comme matériau de construction rejoint la problématique précédemment décrite de la RE 2020), d'autant qu'ils sont cités l'un et l'autre dans la lettre de mission.

⁵³ K.Negishi - Développement d'une méthodologie d'ACV dynamique appliquée aux bâtiments - <https://theses.fr/2019ISAT0013>

4.4 Il paraît prématuré de généraliser l'usage des ACV dynamiques compte-tenu des difficultés méthodologiques qu'elles posent

Au-delà de la difficulté pour la mission d'identifier des objets, outre le bois et le bâtiment, ayant une durée de vie suffisamment longue (de l'ordre de 10 ans) pour justifier des ACV dynamiques, celles-ci posent encore, à cette date, des difficultés méthodologiques importantes.

D'une part, une ACV dynamique, comme toute ACV d'ailleurs, doit porter sur l'ensemble de ses impacts ; à ce stade seules les émissions de CO₂ ont fait l'objet d'études sur la prise en compte du temps. Et on ne dispose pas en général pour les autres impacts de données à long terme.

De façon plus générale, la question de la qualité des données est cruciale pour les ACV. Les calculs sont fondés sur des bases de données lourdes et complexes, et beaucoup résultent d'hypothèses simplificatrices ou constituent des chiffres par défaut. Beaucoup sont anciens et les processus d'actualisation ne sont pas en place. L'amélioration de la qualité des données dans les bases utilisées paraît donc prioritaire pour l'amélioration des ACV. D'autant que de nombreuses sources de données sont extra-européennes.

En résumé, si la prise en compte de la temporalité des émissions dans la RE 2020 est une bonne chose, la généralisation et l'usage d'ACV dynamiques est une fausse bonne idée, à l'exception du secteur du bois.

Il n'en demeure pas moins que, sur le long terme, la mission estime utile d'améliorer les connaissances sur ce type d'ACV, ne serait-ce que pour affiner progressivement la RE 2020.

Recommandation n° 5. [MTE, MESR, ADEME] Poursuivre les travaux scientifiques sur l'ACV dynamique et développer les bases de données de référence que cette méthode nécessite.

4.5 La mise en œuvre d'ACV dynamiques ne paraît pas prioritaire pour les véhicules : l'enjeu est celui de la décarbonation de la production d'électricité

La durée de vie d'un véhicule dépend d'un grand nombre de facteurs : marque, modèle, entretien, usage... On l'estime en moyenne entre 20 et 30 ans pour les véhicules thermiques⁵⁴ et ⁵⁵.

⁵⁴ Selon le [service des données et études statistiques](#) (SDES) du MTE, l'âge moyen des voitures particulières cédées en 2023 pour destruction à un professionnel de l'automobile est de 19,6 ans. Il s'établit à 18,7 ans pour les véhicules au gazole et à 21,6 ans pour les voitures à essence. De plus, selon le rapport de l'UNEP de 2020 intitulé « [Used vehicles and the environment](#) », l'âge moyen des véhicules exportés par les Pays-Bas en Afrique approche les 20 ans dans certains pays. En faisant l'hypothèse que ces véhicules sont ensuite encore largement utilisés, on peut estimer une durée de vie moyenne des véhicules à plus de 20 ans.

⁵⁵ Il n'y a pas encore assez de recul historique sur la durée de vie des batteries pour estimer une durée de vie des véhicules électriques. L'hypothèse retenue de l'utilisation d'une seule batterie pour toute la durée de vie du véhicule est donc très dimensionnante.

La séquence d'émissions de CO₂ est très différente entre un véhicule électrique et un véhicule thermique⁵⁶. Pour un véhicule électrique, on a par rapport au véhicule thermique équivalent un fort surcoût d'émissions initial dû plus particulièrement à la fabrication de la batterie ; ce déficit initial est par contre « amorti » lors de la phase d'utilisation du véhicule électrique si le véhicule parcourt un kilométrage suffisant (variable selon les modèles, mais de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de km). Comme expliqué en introduction, ce cas d'usage est d'ailleurs une des réflexions à l'origine de cette mission et de la question de l'opportunité d'actualiser les émissions de GES.

En réalité, la comparaison du véhicule électrique et du véhicule thermique en termes d'émissions de gaz à effet de serre a donné lieu à de très nombreux travaux, dont les principaux sont cités en bibliographie en annexe 4. Ils mettent en évidence que les principaux facteurs à prendre en compte sont les mix énergétiques utilisés d'une part pour fabriquer le véhicule et d'autre part pour le recharger lors de son utilisation. Ceux-ci dépendent éminemment des lieux de fabrication et d'utilisation du véhicule. A titre d'exemple, une comparaison très développée des performances en termes d'ACV de deux véhicules comparables de sa gamme a été réalisée par Renault (une Zoé équipée d'un moteur électrique d'une part et une Clio équipée d'un moteur à combustion interne d'autre part). Cette comparaison confirme l'analyse ci-dessus sur les émissions de GES⁵⁷.

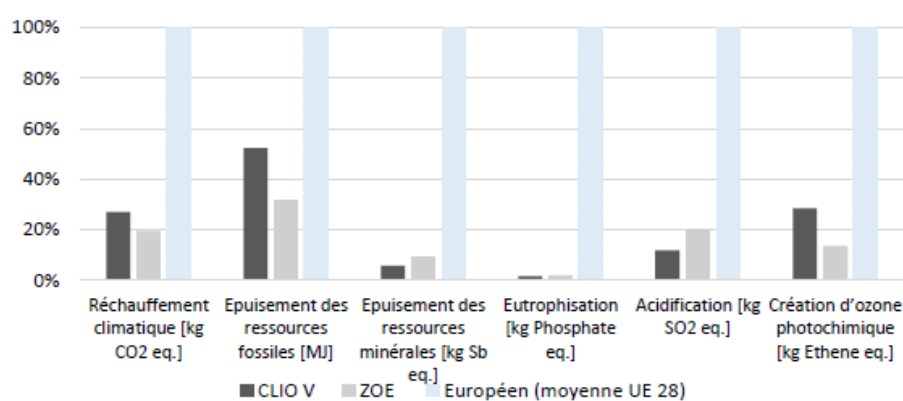


Figure 7 : Résultats normalisés Nouvelle ZOE et CLIO V – Méthode CML

¹ CML méthode développée par l'Institut des sciences environnementales- Université de Leiden, Pays-Bas

² JRC - Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment 2017

Source : Analyse du cycle de vie comparative entre la Nouvelle ZOE et la CLIO V – Renault (2021)

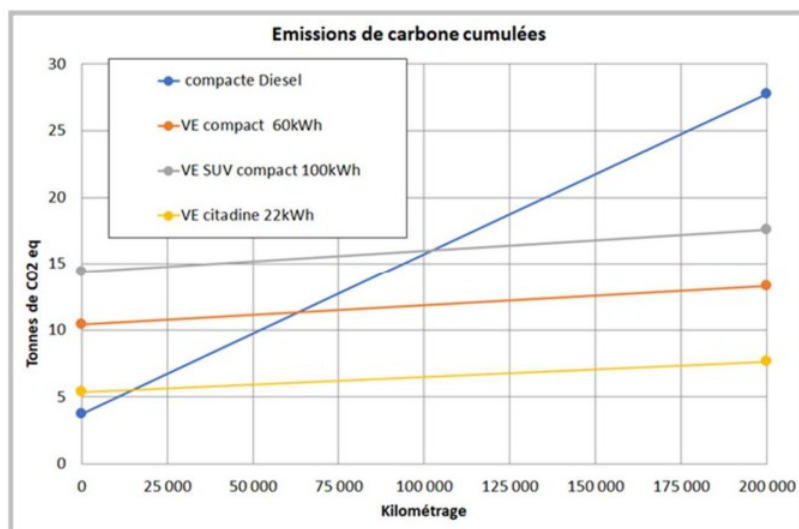
Sauf à utiliser des taux d'actualisation très importants ou des facteurs de pondération décroissant rapidement dans le temps, pondérer les années d'émission des GES n'aurait qu'un impact très marginal sur les résultats de l'ACV relativement à ceux associés aux écarts qui existent en termes d'intensité carbone entre les différents mix énergétiques⁵⁸.

⁵⁶ Sachant que le véhicule électrique présente également des avantages en termes de qualité de l'air, avec des impacts positifs sur la santé humaine.

⁵⁷ L'étude montre également que les véhicules électriques s'avèrent plus défavorables que les véhicules thermiques sur deux vecteurs de risque : l'acidification des océans et l'épuisement des ressources minérales.

⁵⁸ D'un pays à l'autre et dans le temps au sein d'un même pays.

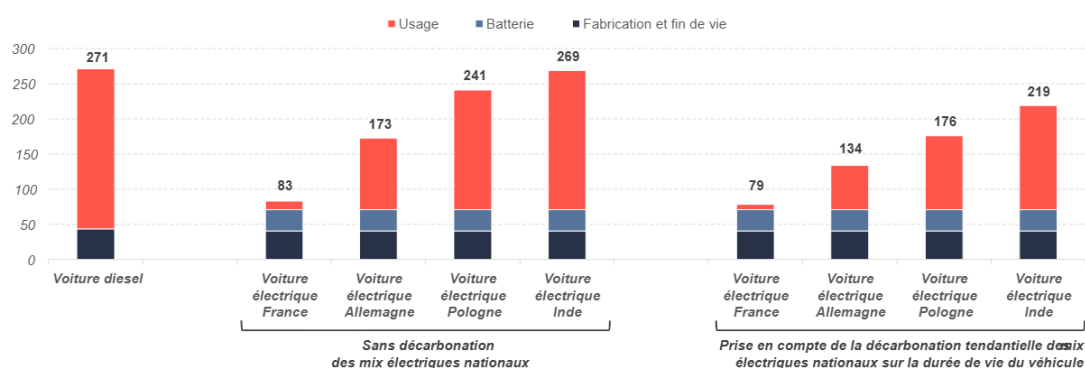
En effet, d'une part, l'étude de l'ADEME sur les voitures électriques et bornes de recharge d'octobre 2022⁵⁹ montre qu'en France, où le mix énergétique est très décarboné, les véhicules électriques de classe « compacte »⁶⁰ émettraient en moyenne 50 % de CO₂ en moins sur l'ensemble de leur cycle de vie par rapport aux véhicules à essence (sur une base de 200 000 km parcourus).



Source : Ademe, Avis sur les voitures électriques et les bornes de recharges, octobre 2022

D'autre part, l'étude de Carbone4 sur les idées reçues sur la voiture électrique de février 2022⁶¹ montre qu'en fonction des mix énergétiques des pays où sont utilisés les véhicules, les émissions de GES lors de la phase d'usage d'un véhicule du segment D⁶² peuvent être 15 à 20 fois plus élevées qu'en France (Pologne, Inde...).

Empreinte carbone moyenne d'une voiture vendue en 2020 en fonction du pays et de la décarbonation des mix électriques – Segment D - 200 000 km | gCO₂e/km



Source : Carbone4, Les idées reçues sur la voiture électrique, Février 2022

⁵⁹ <https://librairie.ademe.fr/ged/7432/avis-ademe-voitures-electriques-et-bornes-recharges-2022-012013.pdf>

⁶⁰ Segment C : https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_des_automobiles

⁶¹ <https://www.carbone4.com/analyse-faq-voiture-electrique>

⁶² Berline familiale

En outre, les engagements pris par les différents pays dans le cadre de l'Accord de Paris devraient se traduire par un verdissement de la production d'électricité, améliorant significativement le bilan du véhicule électrique.

On peut en déduire que l'introduction d'un mécanisme d'actualisation des émissions de GES dans les ACV des véhicules n'est pas utile car de second ordre par rapport à l'impact du niveau de décarbonation des mix électriques utilisés pour la fabrication et la recharge des véhicules en question.

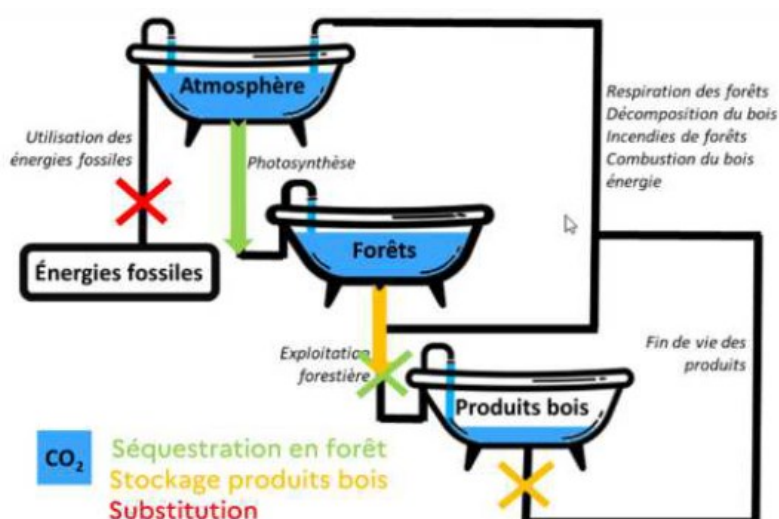
4.6 Les enjeux de l'actualisation dans l'exploitation de la forêt

Compte-tenu de la très grande « durée de vie » des forêts, la question de la prise en compte de la temporalité dans la méthodologie d'évaluation de l'impact de leurs émissions revêt une importance particulière.

4.6.1 Les enjeux attachés à l'exploitation de la forêt et au maintien de son rôle de puits de carbone

Les forêts jouent un rôle crucial dans la lutte contre le réchauffement climatique en capturant et stockant le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique. Le graphique ci-dessous représente les stocks et flux de carbone dans le système atmosphère / forêt / filière bois, avec 3 leviers d'atténuation identifiés :

- la séquestration de carbone en forêt (flèche verte) ;
- le stockage de carbone dans les produits bois (flèche jaune) ;
- la substitution en économisant des émissions d'énergies fossiles par l'utilisation de bois en remplacement des matériaux plus énergivores et fossiles (croix rouge) ; le recyclage permet également l'augmentation du stock de carbone dans les produits.



Source : Annales des Mines, série Responsabilité et environnement, n° 115 - Juillet 2024 - Les forêts dans le changement climatique : nouveaux enjeux⁶³

⁶³ https://annales.org/re/2024/re_115_juillet_2024.pdf

Cela illustre donc que plus on utilise du bois-construction, plus on stocke du CO₂ : plus il y a de forêts, plus on stocke de CO₂ de l'atmosphère (croix rouge). Plus on utilise les forêts à des fins de bois-construction plutôt que de bois-énergie en ne procédant à des coupes qu'une fois les arbres ayant atteint leur maturité, plus on stocke du CO₂ (flèche jaune et croix verte). Plus la durée d'utilisation du bois-construction est longue, plus longtemps on stocke du CO₂ (croix jaune).

Si les capacités de stockage de CO₂ et la vitesse de croissance des arbres varient fortement selon les essences comme l'illustre le tableau ci-dessous, il est important de noter que le réchauffement climatique affecte directement la santé des forêts françaises. En effet, la forêt française est confrontée à des phénomènes tels que des sécheresses accrues, des incendies et la propagation de parasites qui diminuent sa croissance et sa résilience. Sa capacité à jouer leur rôle de puits de carbone est ainsi significativement altérée.

Encadré : Équivalences liées au stockage de carbone par le bois

Critères	Pin de Monterey	Hêtre	Chêne européen
Densité (kg/m ³ , sec)	500-550	650-720	700-750
Carbone stocké (tonnes CO ₂ /m ³)	0,92-1,01	1,20-1,32	1,29-1,38
Croissance (durée de rotation ⁶⁴)	Rapide (15-20 ans)	Moyenne (40-60 ans)	Lente (~150 ans)
Usages principaux	Construction, papier	Mobilier, contreplaqué	Mobilier, parquet

Source : mission sur la base des sources citées en annexe 10

Pour contrer ces effets, les stratégies adaptatives mises en avant dans la **SNBC 2** et renforcées dans la **SNBC 3** préconisent une diversification des essences, l'augmentation de la gestion durable et le renouvellement rapide des plantations. L'objectif est de stabiliser la capacité de stockage de carbone de la forêt française, qui pourrait autrement se transformer en source nette d'émissions d'ici 2050.

Le PIPAME⁶⁵ a estimé les coûts d'abattement pour différents scénarios forestiers :

Scénario	Coût d'abattement (€/tCO ₂)	Bénéfice écologique
Renouvellement massif	45	Élevé
Gestion adaptative	30	Modéré
Non-intervention	70	Faible

Source : PIPAME

4.6.2 Le bois-construction : stockage du carbone et substitution à des matériaux émissifs

Le bois constitue une réserve de carbone efficace lorsque son utilisation est orientée vers des applications à long terme. Contrairement à l'utilisation du bois pour produire de la chaleur qui conduit

⁶⁴ La durée de rotation désigne l'intervalle de temps entre la mise en place d'un peuplement forestier (plantation ou régénération naturelle) et son exploitation finale (récolte des arbres matures).

⁶⁵ Rapport du Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) : « *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020* », publié en février 2012.

à relâcher rapidement le carbone dans l'atmosphère, l'intégration du bois dans la construction délivre un double effet positif :

- **Stockage de carbone dans le temps** : Le bois conserve le carbone capturé par l'arbre durant sa croissance, contribuant ainsi à un stockage prolongé. En France, dans le document FD P 20-651 (2011) « Durabilité des éléments et ouvrages en bois », un très grand nombre d'essences indigènes affichent une durée de vie attendue pouvant aller jusqu'à plus de 100 ans pour les classes d'emploi adaptées⁶⁶. Les dérivés du bois (ossatures, panneaux, etc.) présentent ainsi un excellent rapport coût-bénéfice climatique⁶⁷. En fonction des usages, la durée de stockage du CO₂ séquestré par le bois est plus ou moins longue :

Tableau synthétique des durées de vie des principaux produits dérivés du bois

Catégorie	Exemples de produits	Durée de vie moyenne
Produits à longue durée de vie	Charpentes, ossatures bois, menuiseries extérieures, parquets massifs	50 à 100 ans
Produits à durée de vie intermédiaire	Panneaux de particules, panneaux de fibres, mobilier en bois massif	10 à 30 ans
Produits à courte durée de vie	Emballages en bois, palettes, papiers, cartons	< 10 ans

Source : Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, CITEPA (2024)⁶⁸

- **Substitution à des matériaux à fort impact carbone** : Le bois peut remplacer le béton, l'acier ou le plastique, dont la production génère des émissions significatives.

	Poutre Lamellée collée = moins 85,3 kg éq.CO₂	1 m ³ support plancher ou toiture, pendant 100 ans
	Panneau MDF (Medium Density Fiberboard) Standard Mélaminé = moins 7,35 kg éq. CO₂	1 m ² de panneau standard utilisé en milieu sec, épaisseur 17 mm, posé, non structurale, pendant 50 ans
	Parquet contrecollé 3 plis, parement chêne, épaisseur 13-14 mm, fabriqué en France = moins 2,64 kg éq. CO₂	1 m ² de revêtement de sol intérieur, pose flottante, finition vernis acrylique, sur 45 ans avec 2 rénovations
	Palette = moins 15,0 kg eq. CO₂	neuve standard multi-rotation, durée de vie 8 ans avec réparations et valorisation en bois énergie en fin de vie

Source : [Construction bois : quel impact avec le bilan carbone / Académie d'Agriculture de France](#)

⁶⁶ Etude préliminaire sur la Durée de Vie des Structures Bois dans le cadre de l'élaboration des FDES réalisée par L'Institut Technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-Construction Ameublement). Année de publication : 2021

⁶⁷ Les fiches FDES mettent en avant leur performance environnementale dans une ACV dynamique (cf. annexe 11).

⁶⁸ https://www.citepa.org/wp-content/uploads/2024/12/OMINEA_2024.pdf

D'après l'Académie d'Agriculture, chaque tonne de bois utilisée dans la construction peut éviter l'émission de 2 tCO₂ en comparaison à des matériaux traditionnels.

4.6.3 Bois-énergie et ACV

Dans une étude datée de janvier 2022, l'ADEME fournit une analyse approfondie du cycle de vie (ACV) du bois énergie utilisé pour la production de chaleur dans les secteurs collectif et industrie⁶⁹. Il en ressort que le bois énergie présente un meilleur bilan climatique et une moindre consommation de ressources fossiles que le gaz naturel, sous l'hypothèse de neutralité carbone des émissions de combustion du bois. L'analyse ACV considère divers impacts environnementaux (changement climatique, émissions de particules, acidification, etc.) sur l'ensemble du cycle de vie (sylviculture, préparation, transport, combustion). Elle identifie des leviers d'amélioration : réduction des distances d'approvisionnement, meilleures performances des filtres à particules, valorisation des sous-produits, etc.

Différents scénarios de gestion forestière sont aussi évalués sur des horizons de 30 et 100 ans. Les différences d'impacts sur les émissions de GES de différents scénarios sylvicoles confirment la complexité de la dynamique du carbone forestier.

L'étude reconnaît que certains éléments mériteraient d'être renforcés ou étendus. Ainsi reconnaît-elle que l'hypothèse-clé de la neutralité carbone du bois énergie repose sur un équilibre supposé entre absorption et émissions de CO₂, or celui-ci est sujet à une forte variabilité selon les pratiques forestières, les horizons temporels et les usages.

L'approche « temporelle » développée par l'ADEME (sur 30 et 100 ans), est donc méthodologiquement prometteuse mais reste à consolider scientifiquement (dynamique des puits de carbone, délais de reconstitution des stocks, substitution effective). Il apparaît en outre que :

- les résultats dépendent des hypothèses retenues et des scénarios testés, qui ne couvrent pas toute la diversité des pratiques et installations réelles, et
- les délais entre la coupe et la reconstitution du stock de carbone forestier peuvent atteindre plusieurs décennies, ce qui remet en cause la neutralité à court terme.
- l'impact sur les puits de carbone, selon les pratiques de gestion forestière, peut être négatif dans certains scénarios.
- certaines valeurs utilisées datent de plusieurs années (les progrès récents dans les technologies de combustion et de filtration pourraient modifier sensiblement les résultats).

L'analyse de l'ADEME confirme donc la pertinence d'un recours raisonné au bois énergie pour la production de chaleur, en particulier dans les secteurs collectif et industriel, en raison de ses avantages sur le plan climatique et de sa moindre dépendance aux ressources fossiles, comparativement au gaz naturel.

Ainsi apparaît il nécessaire de dépasser une approche fondée sur la neutralité carbone « instantanée » au profit d'une modélisation dynamique du carbone biogénique, tenant compte des temps de retour carbone et de la durabilité des pratiques forestières.

⁶⁹ Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel ([Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel - La librairie ADEME](#))

4.6.4 La nécessaire priorité à donner au bois-construction

En France et en Europe, plusieurs réglementations encadrent l'usage du bois. La directive européenne **RED II (2018/2001/UE)** sur les énergies renouvelables exige que la biomasse utilisée pour produire de l'énergie respecte des critères de durabilité. Dans le cas de la France, l'utilisation du bois pour la chaleur doit respecter les critères fixés par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et les règlements environnementaux locaux.

Il n'existe pas de réglementation nationale ou européenne interdisant l'usage du bois non fatal pour générer de la chaleur.

L'arrêté du **3 août 2018 relatif aux combustibles autorisés dans les installations de combustion de biomasse**⁷⁰ fixe des prescriptions sur les types de combustibles pouvant être utilisés et impose des restrictions visant à protéger l'environnement et garantir la durabilité. S'il favorise l'utilisation de sous-produits ou de déchets issus d'autres industries pour éviter la coupe directe de bois à usage énergétique, il ne restreint pas à ses seuls sous-produits la contribution du bois à la biomasse utilisée dans les centrales thermiques.

Les tensions déjà perceptibles sur l'utilisation de la biomasse (signalées dans des rapports comme celui du Secrétariat Général à la Planification Écologique, intitulé « Bouclage biomasse : enjeux et orientations »⁷¹ et celui des trois conseils généraux et inspections générales CGE, IGEDD et IGF intitulé « Evaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050 »⁷²) incitent à considérer l'introduction d'un « **merit order** » pour prioriser les usages en fonction de leur valeur ajoutée environnementale, économique et sociale.

La mission estime que le « **merit order** » pourrait être basé sur les principes suivant :

1. **Prioriser les usages à forte valeur ajoutée** et capacité de stockage de carbone importante :
 - les produits bois utilisés dans la construction, qui stockent durablement du carbone ;
 - la production de matériaux biosourcés (panneaux, isolants), car elle remplace des matériaux plus émissifs.
2. **Limiter l'utilisation du bois-énergie issu de la sylviculture** :
 - réserver les parties du tronc aptes à la construction pour le bois-construction et ainsi restreindre le bois-énergie aux sous-produits de la sylviculture (branches, houppiers, éclaircies) et aux déchets issus de la transformation industrielle du bois ;

⁷⁰ Arrêté du 3 août 2018 relatif aux combustibles autorisés dans les installations de combustion de biomasse, en application de la directive européenne sur les émissions industrielles (2010/75/UE). Les dispositions de l'arrêté concernent les installations classées sous les rubriques ICPE 2910 et 3110 (combustion de biomasse).

Arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910 - Légifrance

⁷¹ <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/10/00d496ed6c39499c18e94e799f0803c87649b3f5.pdf>

⁷² <https://www.economie.gouv.fr/cge/biomasse>

Un tel cadre serait pertinent :

- **efficacité climatique** : le bois-énergie émet du CO₂ immédiatement, ce qui contrevient à la logique de stockage du carbone et d'atténuation des pics de température ;
- **préservation de la ressource** : la demande croissante en biomasse menace la gestion durable des forêts, augmentant le risque de déforestation ou de surexploitation ;
- **enjeux sociaux et économiques** : une allocation mal optimisée pourrait réduire la compétitivité des filières bois-construction et matériaux biosourcés.

L'usage direct d'arbres pour alimenter les centrales thermiques à biomasse devrait être interdit en intégrant toutefois des exceptions pour ce qui concerne les sous-produits ou parties des arbres dont la coupe est utile.

S'agissant du bois-construction, son caractère bio sourcé et durable serait renforcé par l'engagement de l'exploitant forestier qui fournit les arbres de replanter les parcelles qui ont fourni ceux-ci.

De nouveaux textes réglementaires ont été publiés le 14⁷³ et 16 décembre 2021 pour encadrer et préciser les exigences sur le contenu des déclarations environnementales des produits de construction et de décoration (FDES) ainsi que sur leur programme de vérification. Ces textes reprennent en grande partie le contenu des textes préexistants, notamment de 2013, sur les déclarations environnementales, dont les FDES⁷⁴. Pour l'instant ce cadre réglementaire n'intègre pas la problématique de la replantation évoquée ci-dessus : un prélèvement net de bois pour approvisionner les fabricants de matériaux, sans replantation obligatoire, est autorisé.

Dans la construction, le bois entre dans de nombreuses applications (charpente, parquet, panneaux, isolants, etc.). Elles sont associées à des procédés de fabrication, des durées de vie et des impacts environnementaux spécifiques.

Une ACV unique pour le bois "construction" ne reflèterait pas la diversité des usages et des produits. En effet, chaque type de matériau ou application nécessite une analyse du cycle de vie distincte pour fournir des résultats précis et exploitables. Cette analyse est assurée par les fiches FDES (Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire). Spécifiques à chaque produit, elles font office de fiches ACV.

⁷³ [Décret n° 2021-1674 du 16 décembre 2021 relatif à la déclaration environnementale de produits de construction et de décoration ainsi que des équipements électriques, électroniques et de génie climatique](#)

[Arrêté du 14 décembre 2021 relatif à la déclaration environnementale des produits destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment et à la déclaration environnementale des produits utilisée pour le calcul de la performance environnementale des bâtiments](#)

[Arrêté du 14 décembre 2021 relatif à la vérification par tierce partie indépendante des déclarations environnementales des produits destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment et des déclarations environnementales des produits utilisées pour le calcul de la performance environnementale des bâtiments](#)

⁷⁴ Les FDES devront désormais obligatoirement faire figurer le carbone d'origine biologique stocké dans le produit qui était déjà à renseigner lors de la saisie d'une FDES dans la base INIES (Stockage de carbone biogénique en kg C sous l'onglet « Indicateurs »).

Recommandation n° 6. [MTE, MASA] Réserver les parties du tronc aptes à la construction pour le bois-construction et ainsi restreindre le bois-énergie aux sous-produits de la sylviculture (branches, houppiers, éclaircies) et aux déchets issus de la transformation industrielle du bois.

Recommandation n° 7. [MTE, MASA] Considérer l'introduction d'une obligation de replanter les parcelles dont les arbres sont exploités pour alimenter la filière de matériaux bio sourcés et prévoir une adaptation des fiches FDES en conséquence.

4.6.5 Emissions de GES liées à l'exploitation des forêts, cycle de vie et actualisation.

4.6.5.1 La remise en cause de la présumée neutralité carbone du bois-énergie

La **neutralité carbone supposée du bois** repose sur l'idée que le carbone libéré lors de la combustion ou de la décomposition du bois est compensé par le carbone capturé lors de la croissance des arbres.

Cette hypothèse est souvent utilisée pour justifier l'utilisation du bois comme source d'énergie ou comme matériau biosourcé. Elle repose sur plusieurs éléments clés :

1. Cycle biologique du carbone :

- les arbres absorbent du CO₂ atmosphérique via la photosynthèse et le stockent sous forme de biomasse ;
- lorsque le bois est brûlé ou décomposé, ce même CO₂ est relâché dans l'atmosphère, supposément en "boucle fermée".

2. Hypothèse temporelle :

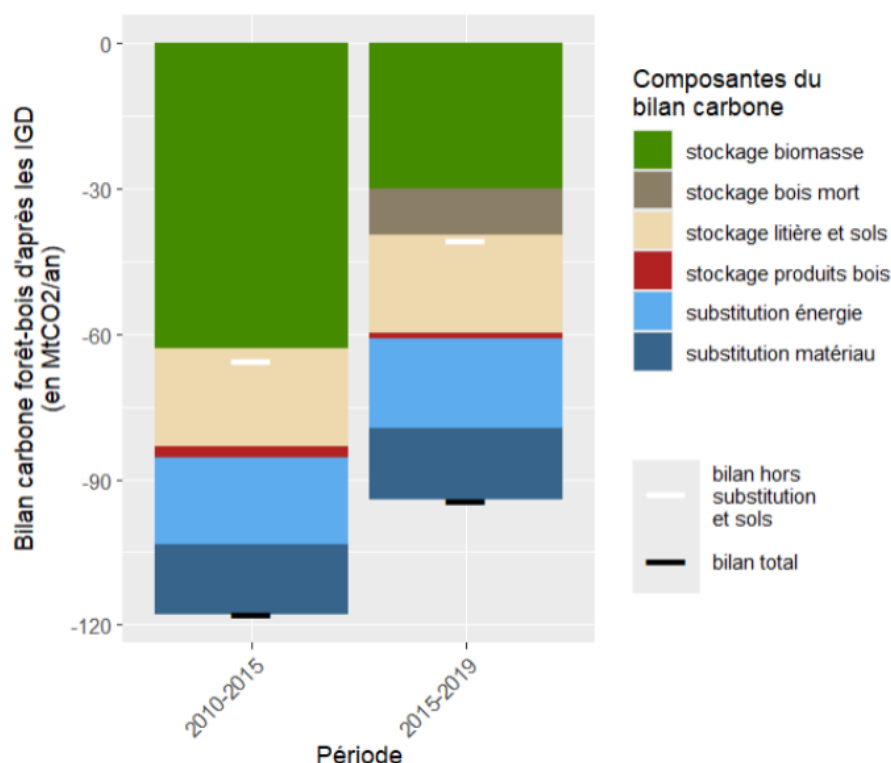
- la neutralité carbone présume que le carbone libéré sera intégralement re-capturé par la repousse des arbres.

Or, plusieurs considérations conduisent la mission à remettre en cause l'hypothèse de la neutralité carbone du bois-énergie :

- **émissions immédiates de CO₂** : la combustion libère instantanément tout le carbone stocké, tandis que le reboisement prend des décennies pour compenser ces émissions. Le bois énergie contribue à court terme à des pics de CO₂ difficilement compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.
- **re-captation partielle du CO₂** : on constate une baisse progressive de la capacité des arbres à stocker le CO₂ comme conséquence d'une hausse de mortalité liée au changement climatique⁷⁵. L'impact de cette baisse de stockage se retrouve dans le bilan carbone du secteur forêt-bois, comme l'illustre le graphique ci-dessous. Le maintien au même niveau du puits de carbone lié à la forêt suppose dorénavant une augmentation de la surface de celle-ci.

⁷⁵ L'inventaire forestier français effectué par l'IGN conclut dans son édition 2024 à un doublement de la mortalité des arbres entre les périodes 2005-2013 et 2014-2022. Ce doublement de la mortalité est notamment dû aux crises sanitaires liées à des conditions climatiques à la fois difficiles pour les arbres (sécheresses et températures élevées) et propices aux insectes xylophages, notamment les scolytes. Voir https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2024.pdf

Figure 22 : Bilan carbone du secteur forêt-bois métropolitain des dernières années par composante et par période sur les années récentes (source : Indicateurs de Gestion Durable 2020 – IGD)



NB : Pour le stockage supplémentaire chaque année dans le compartiment de la litière et des sols, la valeur fournie dans les IGD se base sur le réseau RENECOFOR dont les données font référence à la période 1995-2010. Les coefficients de substitution moyens utilisés dans les IGD sont supérieurs à ceux plus détaillés et précis appliqués dans la présente étude, les valeurs de l'effet substitution du graphique sont donc surestimées par rapport aux calculs des simulations

Source : Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français – FCBA et IGN (2024) - <https://www.ign.fr/publications-de-l-ign/institut/domaines-intervention/foret/rapport-projections-foret-bois-ign-fcba.pdf>

Ainsi, selon Philippe Leturcq⁷⁶, la neutralité du bois énergie est un concept trompeur si l'on ne garantit pas une gestion forestière durable et un maintien des stocks de carbone sur pied (i.e. a minima une obligation de replanter). Le Code forestier français intègre en partie ces préoccupations en imposant des obligations visant à assurer la durabilité des forêts et le maintien de leur capacité à stocker du carbone⁷⁷.

L'analyse en termes de cycle de vie permet de dépasser le sujet de la neutralité carbone du bois et de révéler que la véritable question porte sur la priorité à donner dans l'usage du bois à son incorporation aussi souvent que possible dans les matériaux de construction et de manière plus générale dans tous les usages qui en assurent un stockage aussi longtemps que possible.

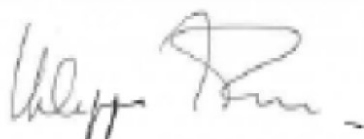
⁷⁶ La neutralité carbone du bois énergie : un concept trompeur ? Revue forestière française, 2011, 63 (6), pp.723-734. <https://hal.science/hal-03449791/file/LETURCQ.pdf>

⁷⁷ Article D352-1 du Code forestier.

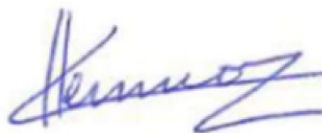
4.6.5.2 L'actualisation appliquée à l'utilisation du bois

L'ACV du bois-construction se fait par convention sur un siècle à partir de la coupe de l'arbre. En considérant que les émissions de GES liées à l'exploitation de la forêt sont quasiment négligeables, les émissions positives de GES se font en essentiellement en toute fin de période avec le brulage du bois après déconstruction du bâtiment et éventuel recyclage. Ainsi, si l'on prend pour hypothèse un brulage à 50 ans (dès déconstruction du bâtiment dont la durée de vie conventionnelle est de 50 ans) et que l'on utilise le taux d'actualisation socio-économique actuel de la France (3,2 %), le poids relatif d'une tonne de CO_{2e} émise à t_0+50 ans par rapport à celle qui aurait été émise à t_0 est de 21 % environ. Si l'on prend pour hypothèse un brulage à t_0+100 ans, ce ratio passe à 4 %. **On constate bien que pour ces durées, l'impact de l'actualisation devient déterminant.**

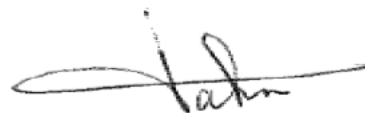
Philippe DESFOSSES
Administrateur général



Colas HENNION
Ingénieur en chef des mines



Philippe KAHN
Ingénieur général des mines



ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de mission**MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA SOUVERAINETÉ
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE***Liberté
Égalité
Fraternité***Conseil général de l'économie**Paris, le **7 JUIN 2024**

N° 2024/01/CGE/RR

Le Vice-président du Conseil général de l'économie

à

Monsieur Philippe KAHN
Monsieur Philippe DESFOSSES
Monsieur Colas HENNION**Objet : méthodologies de prise en compte d'événements à des échéances différentes.**

D'assez nombreux outils ont été développés pour évaluer de façon aussi précise et globale que possible des impacts environnementaux d'un produit, bien ou projet : analyse du cycle de vie, méthode européenne Product Environmental Footprint (PEF), empreinte carbone...

Ces méthodes ont été particulièrement développées pour évaluer les émissions cumulées de gaz à effet de serre (GES), converties en équivalent de tonnes de CO₂.

Très souvent, il arrive que la vie d'un produit, par exemple, se traduise par des séquences temporelles très différentes les unes des autres, pendant lesquelles peuvent se succéder des phases d'impacts très importants et des phases pendant lesquelles, au contraire, les impacts sont très faibles voire positifs.

Ainsi, lorsque l'on évalue, à gamme équivalente, le bilan GES d'un véhicule électrique (batterie incluse), comparé à un véhicule thermique, on constate en général un surcroît d'émissions de GES lié à sa fabrication, suivi de moindres émissions lors de l'usage du véhicule, du moins s'il fait appel à un mix électrique largement décarboné comme en France.

Le processus de production et d'usage du bois présente aussi des séquences très variées : phase de croissance de l'arbre où il stocke progressivement de plus en plus de GES, phase de maturité où il joue un rôle important de puits forestier, éventuellement incendie de forêt se traduisant par des émissions fortes, ou disparition naturelle ou planifiée avec ou non replantation d'arbres, ou encore usage du bois comme énergie renouvelable ou comme matériau de construction de bâtiments.

L'existence de séquences temporelles d'impacts très variés pose la question des méthodes d'agrégation de ces impacts. De façon générale, lorsque les séquences sont très variables dans le temps, la prise en compte d'un taux d'actualisation, à l'instar de ce qui est couramment pratiqué en matière financière, peut permettre de transformer un historique d'impacts en un indicateur unique. Toutefois, le choix de ce taux n'est pas trivial. Il peut impacter très significativement les résultats et les décisions, d'autant plus que les impacts futurs ne peuvent qu'être estimés et peuvent être relativement incertains.

Le choix peut être d'autant moins évident que les effets sur l'environnement ne sont pas linéaires. On sait par exemple que la croissance du stock de GES dans l'atmosphère risque de se traduire à moyen terme par des points de basculement à impact mondial comme l'effondrement des calottes glaciaires de l'Antarctique ou du Groenland, le dépérissement de la forêt amazonienne, l'augmentation du phénomène El Nino, etc. En outre, les effets se cumulent dans le temps, le CO₂ se stockant dans l'atmosphère et y restant plusieurs centaines d'années.

Ceci peut conduire à privilégier des réductions rapides des émissions et donc le choix de taux d'actualisation élevés.

Un tel choix peut cependant inciter à privilégier des solutions à court terme (par exemple remplacement du charbon par le gaz naturel), générant d'importantes difficultés à long terme à cause d'effets de « trappe à carbone » ou « lock-in » (comme basculer ensuite du gaz à l'électricité).

Plusieurs méthodes d'évaluation, par souci de simplification, s'abstiennent d'actualiser, ce qui revient à prendre un taux d'actualisation égal à zéro. D'autres économistes préconisent de prendre en compte des taux d'actualisation décroissant dans le temps. D'autres encore préconisent de prendre le même taux que le taux d'actualisation financier en matière d'investissement public.

Il est important que les méthodes d'évaluation utilisées soient fondées scientifiquement et basées sur des hypothèses à la fois connues, comprises, partagées et assumées.

Dans cet objectif, j'ai décidé de vous confier une mission, pour laquelle :

- vous vous appuyerez sur une revue de la littérature économique existante, pour bien comprendre les différentes théories et leurs sous-jacents ;
- vous examinerez les avantages et inconvénients des principales méthodes actuellement utilisées pour évaluer l'impact d'un produit en approfondissant quelques exemples de produits judicieusement choisis, et la façon dont elles prennent en compte ou non la variabilité des impacts dans le temps ;
- vous formulerez des propositions opérationnelles pour le cas échéant faire évoluer ces méthodes.

Vous vous attacherez à illustrer votre travail notamment pour les exemples cités précédemment comme le véhicule électrique ou le bois-énergie.

En termes de méthode, vous êtes invités à vous appuyer sur les documents et études existants au plan international ainsi que sur les diverses compétences existant sur le sujet, qu'il s'agisse des administrations (Secrétariat général à la planification écologique, Direction générale de l'énergie et du climat, Direction générale du Trésor, Direction générale des entreprises, France Stratégie...), des experts académiques (économie, énergie, climat...), d'autres parties prenantes (fédérations d'entreprises, cercles de réflexion...).

Vous ferez un point d'avancement régulier en section Régulation et Ressources du Conseil et me rendrez compte régulièrement de vos travaux. Votre rapport est attendu pour décembre 2024.



Luc ROUSSEAU

Annexe 2 : Liste des acronymes utilisés

Seuls les acronymes utilisés à plusieurs reprises dans ce rapport sont consignés dans cette annexe.

ACV	Analyse du cycle de vie
AMOC	Atlantic meridional overturning circulation
CEE	Certificat d'économie d'énergie
CGE	Conseil général de l'économie
CGEDD	Conseil général de l'environnement et du développement durable
COR	Conseil d'orientation des retraites
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IGEDD	Inspection générale de l'environnement et du développement durable
IGF	Inspection générale des finances
MASA	Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire
MEFSIN	Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique
MESR	Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
MTE	Ministère de la transition écologique
NGFS	Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System
PRG	Potentiel de réchauffement global
SGPI	Secrétariat général pour l'investissement
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
VAC	Valeur de l'action pour le climat
VAN	Valeur actualisée nette
VTC	Valeur tutélaire du carbone

Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées ou interrogées

Organismes publics et parapublics

Direction générale du Trésor

- M. Edouard CHRETIEN, Sous-directeur TRECO
- M. Paul-Hervé TAMOKOUE-KAMGA, Adjoint au chef du Pôle zéro carbone
- M. Jérémy MARQUIS, Adjoint au chef du Pôle zéro carbone
- M. Jean-Baptiste LAVAL, Adjoint au chef de bureau TRECO 1
- M. Emmanuel BETRY, Sous-directeur PREV
- M. Yann THOMMEN, Adjoint au chef du bureau PREV 1
- M. Bruno QUILLE, Chef du bureau MACRO 1
- M. Pierre-Louis GIRARD, Adjoint au chef du bureau MACRO 1

Direction générale de l'énergie et du climat

- M. Mickaël THIERRY, Sous-directeur de l'action climatique
- M. Samuel LAVAL, Adjoint à la cheffe de bureau climat, pilote du scénario de référence de la SNBC

Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature

- M. Antoine CARON, Sous-directeur de la qualité et du développement durable dans la construction
- M. Etienne BRUNET, Chef du bureau de la performance environnementale du bâtiment et de l'animation territoriale
- M. Vincent LAPEYRE, Chef de projet « qualité environnementale des bâtiments et des produits »

Inspection générale des Finances

- M. Hyppolite d'ALBIS, Inspecteur général des finances
- M. Nicolas LEFEVRE, Inspecteur des finances

France Stratégie

- M. Nicolas RIEDINGER, Directeur du département du développement durable et du numérique
- M. Maxime GIRARDIN, Chef de projet « Transition énergétique »

Ademe

- M. Baptiste PERISSIN-FABERT, Directeur général délégué expertise
- M. David MARCHAL, Directeur de l'expertise et des programmes
- M. Gaël CALLONNEC, Economiste
- Mme Alma MONSERAND, Economiste à la Direction exécutive prospective et recherche

FCBA

- Mme Estelle VIAL, Ingénieur environnement
- M. Gérard DEROUBAIX, Directeur adjoint du Pôle Biosense

CSTB

- Mme Alexandra LEBERT, Responsable du domaine stratégique adaptation et atténuation face au changement climatique
- Mme Marine VESSON, Responsable de l'équipe environnement

IPSL

- Mme Sophie GODIN-BEEKMANN, Directrice de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)
- M. Robert VAUTARD, Directeur de recherche au CNRS, co-président du GT1 du GIEC, ancien directeur de l'IPSL
- M. Freddy BOUCHET, Directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD/IPSL) dans le département de géosciences de l'ENS Paris
- M. Olivier BOUCHER, Directeur de recherche au CNRS et directeur-adjoint de l'IPSL

CIREN

- M. Franck LECOCQ, Directeur du Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIREN), Auteur coordinateur du 6^{ème} rapport du GIEC, participant à la commission Quinet 2019

Ecole des Mines de Paris - PSL

- Mme Nadia MAÏZI, Directrice du centre de mathématiques appliquées (CMA), Directrice de The Transition Institute 1.5, auteur dans l'AR6 du GIEC
- Mme Sandrine SELOSSE, Chargée de recherche au CMA
- M. Edi ASSOUMOU, Chargé de recherche au CMA
- M. Pierre FLECKINGER, Directeur du Centre d'Économie Industrielle (CERNA)

Université de Paris Dauphine - PSL

- M. Christian DE PERTHUIS, Professeur émérite à l'Université de Paris Dauphine - PSL, fondateur de la Chaire Économie du Climat

Autres organismes**The Shift Project**

- M. Michel LEPETIT, Vice-Président co-fondateur
- M. Nicolas RAILLARD, Chef de projet

Toulouse School of Economy

- M. Christian GOLLIER, Directeur général de Toulouse School of Economics, Auteur aux AR4 et AR5 du GIEC, contributeur aux commissions Quinet et Guesnerie

CIRAIG

- M. François SAUNIER, Directeur exécutif adjoint
- M. Jean-François MENARD, Analyste
- M. Pablo TIRADO-SECO, Analyste

Autres experts

- M. Jean JOUZEL, Directeur de recherche émérite au CEA, médaille d'or du CNRS, ex-directeur de l'IPSL
- M. Alain QUINET, Inspecteur général des finances, Directeur général exécutif Stratégie et Affaires Corporate de SNCF Réseaux / Economiste, Président de la commission sur la valeur de l'action sur le climat
- M. Patrick CRIQUI, Directeur de recherche émérite au CNRS et directeur adjoint du laboratoire d'économie appliquée (GAEL) de l'Université Grenoble-Alpes (UGA), Président la commission sur les coûts d'abattement des émissions de gaz à effet de serre
- Mme Valérie MASSON-DELMOTTE, Membre du Haut Conseil pour le Climat, Directrice de recherche au LSCE de l'IPSL, co-Présidente du groupe n° 1 du GIEC de 2015 à 2023

Annexe 4 : Bibliographie

Cette bibliographie se centre sur les documents cités dans ce rapport et n'est ainsi pas exhaustive.

Fonctionnement du climat – points de bascule

- Lenton, Timothy & Held, Hermann & Kriegler, Elmar & Hall, Jim & Lucht, Wolfgang & Rahmstorf, Stefan & Schellnhuber, Hans. (2008). Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105. 1786-93. 10.1073/pnas.0705414105.
- Joos, F., Roth, R., Fuglestad, J. S., Peters, G. P., Enting, I. G., von Bloh, W., Brovkin, V., Burke, E. J., Eby, M., Edwards, N. R., Friedrich, T., Frölicher, T. L., Halloran, P. R., Holden, P. B., Jones, C., Kleinen, T., Mackenzie, F. T., Matsumoto, K., Meinshausen, M., Plattner, G.-K., Reisinger, A., Segschneider, J., Shaffer, G., Steinacher, M., Strassmann, K., Tanaka, K., Timmermann, A., and Weaver, A. J.: Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2793–2825, <https://doi.org/10.5194/acp-13-2793-2013>, 2013.
- Descombes P., Wisz M. S., Leprieur F., Parravicini V., Heine C., Olsen S. M., Swingedouw D., Kulbicki Michel, Mouillot D., Pellissier L. (2015). Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change. *Global Change Biology*, 21 (7), p. 2479-2487. ISSN 1354-1013.
- J. S. Greenbaum, D. D. Blankenship, D. A. Young, T. G. Richter, J. L. Roberts, A. R. A. Aitken, B. Legresy, D. M. Schroeder, R. C. Warner, T. D. van Ommen, M. J. Siegert. Ocean access to a cavity beneath Totten Glacier in East Antarctica. *Nature Geoscience*, 2015; DOI: 10.1038/ngeo2388
- IPCC, 2019 : Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté – Résumé pour les décideurs
- IPCC, 2019 : Rapport Spécial sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat en Évolution (SROCC)
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., doi:10.1017/9781009157896
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844
- D. I. Armstrong McKay et al., *Science* 377, eabn7950 (2022), DOI: 10.1126/science.abn7950
- T. M. Lenton, D.I. Armstrong McKay, S. Loriani, J.F. Abrams, S.J. Lade, J.F. Donges, M. Milkoreit, T. Powell, S.R. Smith, C. Zimm, J.E. Buxton, E. Bailey, L. Laybourn, A. Ghadiali, J.G. Dyke (eds), 2023, *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK

- Schleussner, CF., Ganti, G., Lejeune, Q. et al. Overconfidence in climate overshoot. *Nature* 634, 366–373 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08020-9>
- Académie des Technologies, 2024 : avis intitulé « Augmentation du niveau marin et ses conséquences sur les risques littoraux »
- [The Global Methane Budget 2000-2020](#), by Marielle Saunois, Adrien Martinez, Benjamin Poulter, Zhen Zhang, Peter A. Raymond, Pierre Regnier, Josep G. Canadell, Robert B. Jackson, Prabir K. Patra, Philippe Bousquet, Philippe Ciais, Edward J. Dlugokencky, Xin Lan, George H. Allen, David Bastviken, David J. Beerling, Dmitry A. Belikov, Donald R. Blake, Simona Castaldi, Monica Crippa, Bridget R. Deemer, Fraser Dennison, Giuseppe Etiope, Nicola Gedney, Lena Höglund-Isaksson, Meredith A. Holgerson, Peter O. Hopcroft, Gustaf Hugelius, Akihiko Ito, Atul K. Jain, Rajesh Janardanan, Matthew S. Johnson, Thomas Kleinen, Paul B. Krummel, Ronny Lauerwald, Tingting Li, Xiangyu Liu, Kyle C. McDonald, Joe R. Melton, Jens Mühle, Jurek Müller, Fabiola Murguía-Flores, Yosuke Niwa, Sergio Noce, Shufen Pan, Robert J. Parker, Changhui Peng, Michel Ramonet, William J. Riley, Gerard Rocher-Ros, Judith A. Rosentreter, Motoki Sasakawa, Arjo Segers, Steven J. Smith, Emily H. Stanley, Joël Thanwerdas, Hanqin Tian, Aki Tsuruta, Francesco N. Tubiello, Thomas S. Weber, Guido R. van der Werf, Douglas E. J. Worthy, Yi Xi, Yukio Yoshida, Wenxin Zhang, Bo Zheng, Qing Zhu, Qian Zhu and Qianlai Zhuang (2024), *Earth System Science Data* (preprint), 2024, DOI:10.5194/essd-2024-115

Actualisation

- Commission présidée par Nicholas Stern, rapport « The Review of Economics on Climate Change » (2006)
- Rapport de la mission du Commissariat général à la stratégie et la prospective présidée par Émile Quinet et intitulé « Evaluation socio-économique des investissements publics » (2013)
- Comité d'experts des méthodes d'évaluation socio-économique des investissements publics – « La révision du taux d'actualisation, Avis et recommandations du Comité d'experts sur le calcul socioéconomique des investissements publics » (2021)
- Comité d'experts des méthodes d'évaluation socio-économique des investissements publics – « Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics » (2023)
- Christian Gollier, Frederick van der Ploeg, Jiakun Zheng. The discounting premium puzzle: Survey evidence from professional economists. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2023, 122, pp.102882. [ff10.1016/j.jeem.2023.102882](https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102882). [ffhal-04227459](https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102882)
- Christian Gollier, Toulouse School of Economics, University of Toulouse-Capitole – « Discounting » (2024)

Coût social du carbone

- Inspection générale des finances – « Evaluation des procédures d'évaluation socio-économique des projets d'investissements publics » (2016)
- Commission Alain Quinet – « La valeur de l'action pour le climat Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques » (2019)
- Conseil général de l'économie – « Les outils de régulation économique du carbone » (2022)
- Inspection générale des finances – « Evaluation des procédures d'évaluation socio-économique des projets d'investissements publics » (2023)
- U.S. Environmental Protection Agency – « Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances » (2023)

- Commission Alain Quinet – « La valeur de l'action pour le climat : une référence pour évaluer et agir » (2025)

Impact du changement climatique sur la croissance économique à long terme

- Risky business project, rapport « RISKY BUSINESS: The Economic Risks of Climate Change in the United States » (2014)
- Rapport annuel du Conseil d'orientation des retraites 2020
- Rapport annuel du Conseil d'orientation des retraites 2023
- Rapport annuel du Conseil d'orientation des retraites 2024
- Commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement, rapport intitulé « Partie 1 : méthodologie » (2021)
- Commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement, note de synthèse intitulée « Les coûts d'abattement en France » (2023)
- Commission internationale Blanchard-Tirole, rapport intitulé « Les grands défis économiques » (2021)
- Jean Pisani-Ferry, Selma Mahfouz, « Les incidences économiques de l'action pour le climat » (2023)
- DG Trésor, Rapport intermédiaire « Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone » (2023)
- DG Trésor, Rapport final « Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone » (2025)
- Senne Aerts, Livio Stracca, Agnieszka Trzcinska, article intitulé « Economic losses from climate change are probably larger than you think: New NGFS scenarios », CEPR (2024)
- Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. *Nature* **628**, 551–557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>
- The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature, Adrien Bilal and Diego R. Känzig, NBER Working Paper No. 32450 May 2024, Revised November 2024 JEL No. E01, E23, F18, O44, Q54, Q56
- NGFS long-term scenarios for central banks and supervisors, NGFS (2024)

Potentiel de réchauffement global (PRG) - méthane

- Shine, K.P., Fuglestvedt, J.S., Hailemariam, K. et al. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Climatic Change* 68, 281–302 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10584-005-1146-9>
- Boucher, O.: Comparison of physically- and economically-based CO₂-equivalences for methane, *Earth Syst. Dynam.*, 3, 49–61, <https://doi.org/10.5194/esd-3-49-2012>, 2012
- Allen, M., Fuglestvedt, J., Shine, K. et al. New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Clim Change* 6, 773–776 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate2998>
- Cain, M., Lynch, J., Allen, M.R. et al. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *npj Clim Atmos Sci* 2, 29 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4>
- Global Methane Budget 2000–2020. Marielle Saunoy, Adrien Martinez, Benjamin Poulter, Zhen Zhang, Peter Raymond, Pierre Regnier, Joseph G. Canadell, Robert B. Jackson, Prabir K. Patra, Philippe Bousquet, Philippe Ciais, Edward J. Dlugokencky, Xin Lan, George H. Allen, David Bastviken, David J. Beerling, Dmitry A. Belikov, Donald R. Blake, Simona Castaldi, Monica Crippa,

Bridget R. Deemer, Fraser Dennison, Giuseppe Etiope, Nicola Gedney, Lena Höglund-Isaksson, Meredith A. Holgerson, Peter O. Hopcroft, Gustaf Hugelius, Akihito Ito, Atul K. Jain, Rajesh Janardanan, Matthew S. Johnson, Thomas Kleinen, Paul Krummel, Ronny Lauerwald, Tingting Li, Xiangyu Liu, Kyle C. McDonald, Joe R. Melton, Jens Mühle, Jurek Müller, Fabiola Murguía-Flores, Yosuke Niwa, Sergio Noce, Shufen Pan, Robert J. Parker, Changhui Peng, Michel Ramonet, William J. Riley, Gerard Rocher-Ros, Judith A. Rosentreter, Motoki Sasakawa, Arjo Segers, Steven J. Smith, Emily H. Stanley, Joel Thanwerdas, Hanquin Tian, Aki Tsuruta, Francesco N. Tubiello, Thomas S. Weber, Guido van der Werf, Doug E. Worthy, Yi Xi, Yukio Yoshida, Wenxin Zhang, Bo Zheng, Qing Zhu, Qiuhan Zhu, and Qianlai Zhuang

- United Nations Environment Programme/Climate and Clean Air Coalition (2022). Global Methane Assessment: 2030 Baseline Report Summary for Policymakers. Nairobi.
- Christian de Perthuis, Christian Couturier, Sophie Szopa - Le méthane dans les stratégies d'atténuation : un enjeu majeur - La Fabrique écologique (2024)
- Christian de Perthuis - A la recherche des bonnes équivalences climatiques entre CO₂ et méthane (2024)
- R. S. J. Tol, T. K. Berntsen, B. C. O'Neill, J. S. Fuglestad, K. P. Shine, A unifying framework for metrics for aggregating the climate effect of different emissions. *Environ. Res. Lett.* 7, 044006 (2012)

Géo-ingénierie

- Siebert, Martin & Sevestre, Heidi & Bentley, Michael & Brigham-Grette, J. & Burgess, Henry & Buzzard, Sammie & Cavitte, Marie & Chown, Steven & Colleoni, Florence & DeConto, Robert & Fricker, Helen & Gasson, Edward & Grant, Susie & Gulisano, Adriana & Hancock, Susana & Hendry, Katharine & Henley, Sian & Hock, Regine & Hughes, Kevin & Truffer, Martin. (2024). Safeguarding the polar regions from dangerous geoengineering. 10.13140/RG.2.2.13179.94246.
- European Union Scientific Advice Mechanism, 2024 : rapport intitulé « Solar Radiation Modification »
- Kopp, R.E., Gilmore, E.A., Shwom, R.L. et al. 'Tipping points' confuse and can distract from urgent climate action. *Nat. Clim. Chang.* 15, 29–36 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02196-8>

Certificats d'économie d'énergie (CEE)

- Rapport CGE, CGEDD et IGF sur la 5^{ème} période des CEE (2020) – non publié
- Rapport CGE, IGEDD et IGF sur la 6^{ème} période des CEE (2024)

ACV dynamique – RE 2020

- Score LCA, 2024 : dimension dynamique en ACV, Bernard DE CAEVEL, Isabelle DESCOS, Josquin VANDEPUTTE (RDC Environment)
- FCBA, 2022, Bilan gaz à effet de serre des produits bois
- Mélanie Guiton, Enrico Benetto. Analyse du cycle de vie conséquentielle : identification des conditions de mise en œuvre et des bonnes pratiques rapport final. [Rapport de recherche] 2012-01, SCORELCA.2013. hal-02883711
- CSTB, 2020. Comprendre l'ACV dynamique
- Bertrand Laratte. Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie. Etudes de l'environnement. Université de Technologie de Troyes, 2013. Français. NNT : 2013TROY0033
- CEREMA. L'ACV dynamique dans la RE 2020

- F. Joos, R. Roth, J. S. Fuglestvedt, G. P. Peters, I. G. Enting, W. von Bloh, V. Brovkin, E. J. Burke, M. Eby, N. R. Edwards, T. Friedrich, T. L. Frölicher, P. R. Halloran, P. B. Holden, C. Jones, T. Kleinen, F. T. Mackenzie, K. Matsumoto, M. Meinshausen, G.-K. Plattner, A. Reisinger, J. Segschneider, G. Shaffer, M. Steinacher, K. Strassmann, K. Tanaka, A. Timmermann, and A. J. Weaver, Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis
- FCBA, 2008 : « Durabilité des produits en bois : évaluation des durées de vie en service des ouvrages en bois »
- Koji Negishi, 2019 : Thèse intitulée « Développement d'une méthodologie d'ACV dynamique appliquée aux bâtiments » <https://theses.fr/2019ISAT0013>
- G. Deroubaix, E. Vial, 2021 : Les atouts et points de vigilance pour les produits bois dans l'ACV dynamique du bâtiment – FCBA

Véhicules électriques

- ADEME, 2022 : avis intitulé « Voitures électriques et bornes de recharge »
- Stéphane Amant, Clément Mallet, Nicolas Meunier, Juliette Sorret, Marion Subtil, 2022 : article intitulé « Les idées reçues sur la voiture électrique » - Carbone4
- Renault : analyse du cycle de vie (ACV) comparative entre la Nouvelle ZOE (véhicule électrique) et la CLIO V (véhicule thermique) afin d'évaluer leurs performances environnementales respectives (étude disponible en ligne)

Gestion des forêts, bois-construction et bois-énergie

- Philippe Leturcq. La neutralité carbone du bois énergie : un concept trompeur ? Revue forestière française, 2011, 63 (6), pp.723-734. ff10.4267/2042/47204ff. ffhal-03449791f - <https://hal.science/hal-03449791/file/LETURCQ.pdf>
- Rapport du Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) : « *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020* », publié en février 2012
- FCBA et CODIFAB, 2021, Etude préliminaire sur la Durée de Vie des Structures Bois dans le cadre de l'élaboration des FDES
- ADEME. X. Logel, J. Lhotellier, B. De Caemel, C. Alexandre, S. Cousin, E. Vial, A. Thivolle-Cazat, P. Cailly, AL Dubilly, M. Buitrago, M. Durand, E. Machefaux et J. Mousset. Janvier 2022. Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel – Rapport
- Libert-Amico, A., Duchelle, A.E., Cobb, A., Peccoud, V. & Djoudi, H. 2022. Forest-based adaptation: transformational adaptation through forests and trees. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2886en>
- CGAAER, CGE, IGEDD, 2023 : Rapport « Evaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050 »
- Annales des mines, série Responsabilité et Environnement, n°115 de juillet 2024 intitulé « Les forêts dans le changement climatique : nouveaux enjeux » - https://annales.org/re/2024/re_115_juillet_2024.pdf
- SGPE, 2024 : « Bouclage biomasse : enjeux et orientations »
- CITEPA, 2024 : « Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France » - https://www.citepa.org/wp-content/uploads/2024/12/OMINEA_2024.pdf

Annexe 5 : Recours à l'actualisation par les fonds de pension

Les fonds de pension utilisent la **technique de l'actualisation** pour calculer les cotisations qu'il faut payer aujourd'hui pour garantir le versement des pensions de retraite futures. Cette méthode repose sur le principe économique selon lequel une somme d'argent disponible aujourd'hui a une valeur supérieure à la même somme reçue dans le futur, en raison de la capacité d'investissement et du rendement possible de cette somme.

1. Principes de base de l'actualisation

L'actualisation consiste à ramener les engagements futurs (les pensions à verser) à leur **valeur actuelle** en utilisant un **taux d'actualisation**. Ce taux représente le coût du temps et les rendements espérés sur les investissements financiers. Ainsi, les cotisations prélevées aujourd'hui doivent être suffisantes pour accumuler, grâce à leur placement, un capital permettant de couvrir les prestations futures.

2. Calcul des cotisations

Les cotisations sont déterminées en tenant compte :

- des engagements futurs du fonds (montant et durée des pensions à verser) ;
- des hypothèses démographiques (espérance de vie, âge de départ à la retraite) ;
- et du rendement attendu sur les actifs financiers dans lesquels le fonds investit.

Pour garantir l'équilibre financier du fonds (dont la valeur actuelle des engagements doit toujours être couverte par la valeur comptable des actifs mis en représentation des engagements), il est essentiel que les actifs accumulés aujourd'hui produisent des rendements suffisants pour financer les engagements futurs actualisés.

3. Lien entre rendement des actifs et taux d'actualisation

Le **taux de rendement comptable des actifs** (i.e., les performances des placements réalisés par le fonds) doit **au minimum excéder le taux d'actualisation des engagements, car** :

- Si le rendement des actifs est **inférieur au taux d'actualisation**, les cotisations prélevées aujourd'hui seront insuffisantes pour couvrir les engagements futurs, ce qui entraînera un déficit et le fonds risque rapidement de ne plus couvrir à 100 % ses engagements.
- En revanche, si le rendement est **supérieur**, le fonds peut maintenir un équilibre ou générer un excédent, renforçant ainsi sa capacité à absorber les aléas (variations des marchés, allongement de l'espérance de vie, etc.).

4. taux d'actualisation et équilibre d'un fonds de pension

Un taux d'actualisation « trop » élevé, au sens où le fonds de pension ne parvient pas à investir de manière suffisamment rentable pour que la valeur comptable des actifs couvre intégralement la valeur actuelle des engagements du fonds, est exposé à un **risque d'insolvabilité**. À l'inverse, une gestion prudente qui favorise des rendements stables et supérieurs au taux d'actualisation garantit la pérennité du système et la sécurité des pensions promises.

L'équilibre entre le rendement des actifs et le taux d'actualisation est central dans la tarification des pensions. Il conditionne la viabilité à long terme des fonds de pension et leur capacité à honorer leurs engagements vis-à-vis des retraités.

Par exemple, aux Etats Unis, les fonds de pension publics, même s'ils ont commencé à réduire leurs taux d'actualisation, continuent d'actualiser leurs engagements avec des taux très optimistes au mieux, au pire irréalistes. En effet, certains continuent d'utiliser un taux de 7 %. A titre de comparaison, en France, l'ERAFP (Etablissement de la Retraite Additionnelle de la Fonction Publique) actualise ses engagements au taux de **1,2 %** au 31 décembre 2023 (la réglementation prévoit par ailleurs qu'il ne peut excéder 3 %). Cette différence qui reflète aussi une approche prudentielle plus exigeante en Europe explique pourquoi l'ERAFP couvre l'intégralité de ses engagements (taux de couverture comptable à fin 2023 de 112,9 %) et affiche même une sur couverture avec un taux de couverture économique c'est-à-dire en tenant compte des plus-values latentes sur les actifs à revenu variable de 127,8 % quand Calpers⁷⁸ ne les couvre qu'à hauteur de 71,4 % en 2023 malgré un taux d'actualisation de 6,8 %.

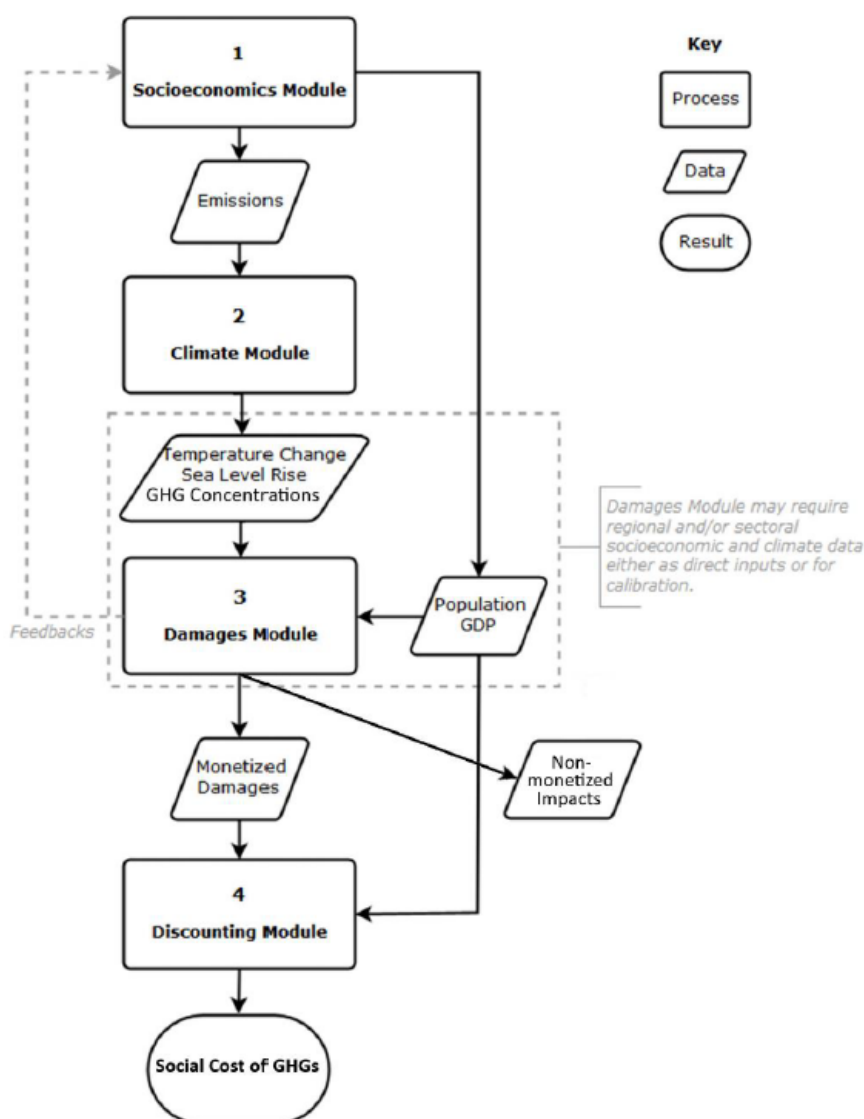
⁷⁸ California Public Employees' Retirement System. Voir <https://www.calpers.ca.gov/docs/forms-publications/governance-and-sustainability-principles.pdf>

Annexe 6 : Méthode « coût-bénéfice » de calcul du coût social du carbone

Cette méthode consiste à identifier la valeur du carbone qui égalise le coût marginal des dommages liés à l'émission d'une tonne de CO₂ et le coût marginal de la réduction de ces mêmes dommages.

Cette logique, inspirée des travaux historiques d'Arthur Pigou sur les externalités, a été appliquée dès les premiers travaux sur le climat de William Nordhaus, puis reprise notamment dans le rapport Stern (2006). Elle conduit à calculer, au niveau mondial, le dommage subi par l'humanité du fait de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, indépendamment du pays à l'origine de l'émission et de la localisation des dommages. C'est la méthode qui est retenue aux Etats-Unis par exemple et la valeur du carbone ainsi calculée est appelée dans la littérature anglo-saxonne « coût social du carbone » (social cost of carbon). Traditionnellement, cette valeur sociale du carbone est l'aboutissement de l'application en série de quatre modules :

Figure 2.1: The Four Components of SC-GHG Estimation



Source: Adapted from National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2017)

❖ Module socio-économique

La première étape du processus d'estimation du coût social du carbone consiste à élaborer des projections des variables socioéconomiques et des émissions de GES à la résolution spatiale et temporelle requise par les modules sur le climat et les dommages⁷⁹. Les trajectoires socioéconomiques sont étroitement liées aux dommages climatiques car, toutes choses étant égales par ailleurs, l'augmentation de la population et des revenus entraînera une augmentation des émissions de GES et conduira à une plus grande volonté de payer pour éviter les impacts du changement climatique. Dans le cadre du processus d'estimation du coût social du carbone, les projections des émissions de GES servent d'entrées au module sur le climat, et les projections du PIB et de la population servent d'entrées aux modules sur la fonction de dommages et d'actualisation.

❖ Module climatique

L'étape suivante du processus d'estimation SC-GES consiste à estimer l'effet des émissions sur les variables climatiques physiques, telles que la température, et à s'assurer que les résultats du modèle climatique sont à la résolution spatiale et temporelle requise par le module de dommages. Cela signifie que le module climatique doit :

1. Traduire les projections d'émissions de GES et d'autres agents de forçage en concentrations atmosphériques, en tenant compte de l'absorption de CO₂ par la biosphère terrestre et l'océan et de l'élimination d'autres gaz à effet de serre par les réactions atmosphériques, les dépôts et/ou d'autres mécanismes
2. Traduire les concentrations de gaz à effet de serre et d'autres agents de forçage en forçage radiatif
3. Traduire le forçage en évolution de la température moyenne de surface mondiale, en tenant compte de l'absorption de chaleur par l'océan, et
4. Générer d'autres variables climatiques, telles que l'élévation du niveau de la mer, qui peuvent être nécessaires au module de dommages.

❖ Module dommages climatiques

Le module de dommages contient les « fonctions de dommages » de base du processus d'estimation SC-GES. Les fonctions de dommages traduisent les paramètres physiques du changement climatique (en premier lieu la température) en estimations monétisées des dommages économiques nets. Les fonctions de dommages modélisent plusieurs vecteurs de dommages, globalement divisés en vecteurs marchands et non marchands. Certains dommages économiques nets sont subis par le biais du marché, tels que les changements de productivité agricole, les dépenses énergétiques et les dommages matériels dus à un risque accru d'inondation. Parmi les exemples de dommages subis via des vecteurs non marchands, on peut citer les changements dans les taux de mortalité et les changements dans les services écosystémiques, y compris ceux fournis par la biodiversité.

⁷⁹ Ces variables sont donc considérées comme exogènes...

❖ Module d'actualisation

Les dommages résultent de l'accumulation des GES dans l'atmosphère au fil du temps. Comme les GES ont une durée de vie parfois très longue, les dommages en résultant se produisent pendant plusieurs décennies voire siècles. Dans le cadre du calcul de la valeur sociale du carbone, le flux des dommages marginaux futurs, tel qu'estimé dans le module précédant, est calculé en termes de consommation réduite (ou d'équivalents de consommation monétaire). Le flux de dommages futurs est ensuite actualisé à sa valeur dans l'année où l'unité supplémentaire d'émissions a été libérée. Étant donné l'horizon temporel long sur lequel les dommages sont censés se produire, l'approche d'actualisation influence grandement la VAN des dommages futurs.

Annexe 7 : Méthode « coût-efficacité » de calcul du coût social du carbone

Une autre démarche, complémentaire à la précédente, est dite coûts-efficacité. Celle-ci consiste à identifier la valeur d'une tonne CO₂e évitée que les acteurs économiques devraient prendre en compte dans leurs décisions de consommation ou d'investissement pour que le pays atteigne ses objectifs de décarbonation. Par rapport à une démarche « coûts-bénéfices », cette logique permet de s'affranchir des incertitudes sur l'évaluation des dommages, en se fondant sur un objectif reflétant les préférences collectives.

C'est la méthode qu'a retenue la France, de façon à optimiser sur le plan économique la trajectoire permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 prévu par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC)⁸⁰. Ainsi la commission Quinet a proposé une trajectoire de la valeur tutélaire du carbone (VTC). Cette VTC ainsi définie représente la valeur pour la société des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui doit permettre d'atteindre l'objectif de neutralité.

Le déploiement de cette méthode se fait ainsi en trois étapes :

- ❖ **Les objectifs de décarbonation** : Par l'Accord de Paris de 2015, les États signataires se sont fixés comme ambition collective de parvenir à la neutralité carbone, c'est-à-dire à l'équilibre entre émissions de gaz à effet de serre et capacités d'absorption des puits. Pour contribuer à l'effort collectif indispensable, la France s'est fixé l'objectif « zéro émissions nettes » (ZEN) de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 dans la SNBC 2. Ces objectifs sont ensuite déclinés en budgets carbone qui sont des plafonds d'émissions de GES fixés par périodes successives de quatre à cinq ans. Ces plafonds définissent une trajectoire précise de baisse des émissions du pays pour atteindre les cibles de moyen et long terme.
- ❖ **L'identification des actions à mener pour atteindre ces objectifs et leur priorisation** : La commission présidée par Alain Quinet, appuyée par les équipes de France Stratégie, a procédé à une identification des principales options stratégiques en matière de décarbonation, secteur par secteur, puis à des estimations de coûts d'abattement sur la base d'hypothèses d'effets d'apprentissage sur ces technologies et de prospective technologique. Par la suite, ce travail a été repris par la commission sur les coûts d'abattement présidée par Patrick Criqui pour procéder à des évaluations assez précises des coûts d'abattement actuel de plus options stratégiques principales⁸¹. Le coût d'abattement est l'écart de coût actualisé entre l'action de décarbonation et la solution de référence carbonée équivalente, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre évitées par l'action. C'est donc une notion de coût unitaire, du point de vue de la collectivité, de la réduction des émissions de GES. Le calcul des coûts d'abattement permet de :
 - construire une gradation des actions à coût faible ou nul, à coût maîtrisé, à coût élevé, pour des technologies matures et pour des technologies en développement ;

⁸⁰ SNBC 2 au moment de la Commission Quinet 2019 qui a élaboré la première courbe de valeur tutélaire du carbone en France.

⁸¹ Transports, électricité, hydrogène, logement, ciment, acier.

- comparer les différentes options entre elles, secteur par secteur et pour différents horizons de temps, et donc établir des priorités d'action ;
- apprécier l'importance des efforts que la collectivité doit consacrer pour promouvoir, à travers les politiques publiques, les principales options de réduction socialement coût-efficaces, en particulier lorsque les décisions des acteurs décentralisés ne conduisent pas spontanément à leur mise en œuvre.

❖ **La définition d'une courbe d'évolution de la valeur tutélaire du carbone pour atteindre les objectifs de décarbonation via la rentabilisation économique progressive des actions de décarbonation :** Cette VTC découle d'une démarche « signal-réponse » : à partir de représentations modélisées du système énergie-économie, on simule l'introduction d'un signal-prix pour les émissions de GES, en recherchant le niveau qui permettrait d'atteindre les objectifs retenus pour les différents horizons de temps. Cela vise donc à déterminer le coût minimal de réduction des émissions de gaz à effet de serre, pour l'objectif de réduction des émissions fixé par la France. Dans le cadre d'une évaluation socio-économique en France, c'est donc la valeur de la VTC que l'on applique aux émissions de GES de chaque année avant de procéder à l'actualisation de l'ensemble des coûts et revenus. Ce faisant, il est à noter que cette approche n'intègre donc pas de différence d'impact climatique liée au décalage temporel des émissions de GES.

Il est à noter que cette trajectoire de VTC vient d'être mise à jour en mars 2025 par une commission à nouveau présidée par Alain Quinet⁸² pour intégrer les évolutions liées au paquet européen Fit for 55 et à la SNBC 3 en cours de finalisation⁸³. Les principales évolutions de la VTC sont :

- le niveau de départ 2025 de la valeur de l'action pour le climat est sensiblement rehaussé, de 187 €₂₀₂₃ à 256 €₂₀₂₃. Cette revalorisation est cohérente avec le relèvement de l'objectif intermédiaire de réduction des émissions brutes 2030 de -40 % à -50 % par rapport à 1990. Ce relèvement permet une meilleure répartition des efforts dans le temps entre aujourd'hui et 2050. Il est en outre cohérent avec le fort besoin d'investissements supplémentaires d'ici 2030 identifié dans le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023) sur les incidences économiques de l'action pour le climat.
- à partir de ce point de départ sensiblement rehaussé, la valeur de l'action pour le climat progresse chaque année au rythme du taux d'actualisation.

⁸² <https://www.strategie.gouv.fr/publications/la-valeur-de-laction-pour-le-climat-une-reference-pour-evaluer-et-agir>

⁸³ La consultation publique a été lancée en novembre 2024.

Annexe 8 : Principaux travaux d'évaluation de l'impact économique du changement climatique

Les travaux d'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'économie de nos sociétés se multiplient. En effet, l'augmentation bien perceptible des aléas climatiques conduit à un renforcement de la prise de conscience des populations et à un investissement croissant dans ce domaine, tant de la part des organismes publics de recherche que des grandes institutions financières de la planète (banques, assureurs, multinationales...).

Comme l'illustre très bien le tableau ci-dessous, on constate une augmentation assez significative des impacts anticipés du changement climatique sur le PIB de la planète au fur et à mesure que la recherche se développe. En effet, les modèles s'améliorent et intègrent progressivement davantage de dimensions des impacts du changement climatique.

Table 1 Loss estimates across a subset of damage functions

Study	Type of damage function	Projected impact of 1°C incremental global temperature increase	Projected global GDP loss by 2100 in the absence of further climate action
Nordhaus and Boyer (2000)	Enumeration	1%	2%
Weitzman (2012)	Enumeration	1%	3%
Dell et al. (2012)	Econometric	7%	22%
Tol (2014)	Meta-analysis	1%	2%
Nordhaus (2014)	Enumeration	1%	2%
Dietz and Stern (2015)	Enumeration	3%	13%
Burke et al. (2015)	Econometric	10%	14%
Howard and Sterner (2017)	Meta-analysis	4%	8%
Kompas et al. (2018)	CGE	1%	2%
Kalkuhl and Wenz (2020)	Econometric	3%	5%
Howard and Sylvan (2020)	Survey	4%	8%
Kahn et al. (2021)	Econometric	4%	8%
Waidelich et al. (2024)	Econometric	5%	8%
Bilal and Känzig (2024)	Econometric	25%	44%
Kotz et al. (2024)	Econometric	19%	33%

Notes: Loss estimates are displayed for a 1°C incremental global temperature increase, which corresponds to a global warming level of 2.2°C compared to the pre-industrial average (considering that the currently observed level of global warming stands at 1.2°C above the pre-industrial average). All calculations are based on projections in line with the NGFS 'current policies' scenario, which foresees that a global warming level around 3°C above the pre-industrial average is reached by 2100.

Source: Own calculations.

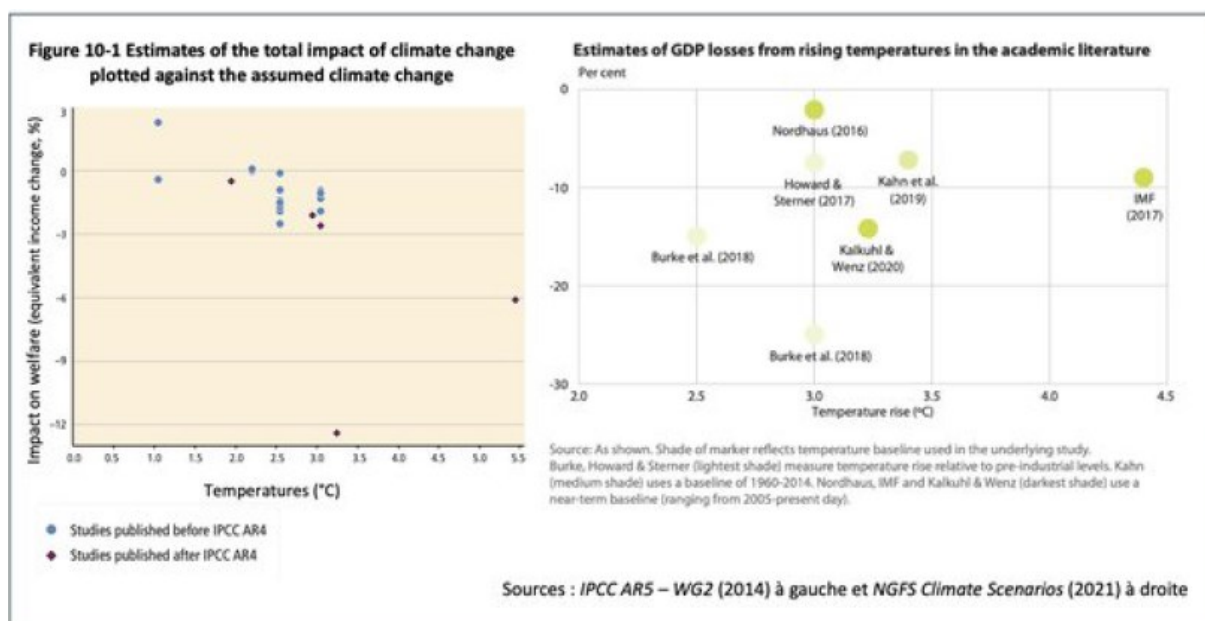
Source : Senne Aerts, Livio Stracca, Agnieszka Trzcinska, article intitulé « Economic losses from climate change are probably larger than you think: New NGFS scenarios », CEPR (2024) - <https://cepr.org/voxeu/columns/economic-losses-climate-change-are-probably-larger-you-think-new-ngfs-scenarios>

Cette annexe a pour vocation de présenter succinctement et de manière illustrée les principaux résultats d'une sélection de travaux récents.

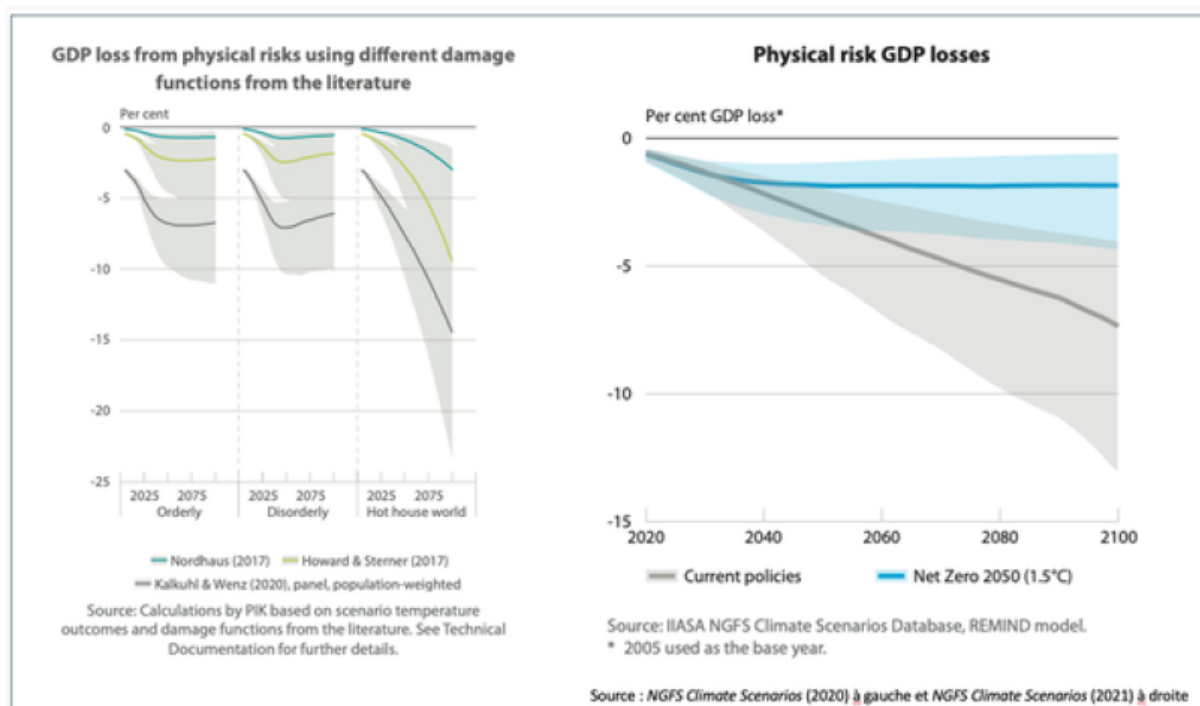
1. Article de TheOtherEconomy « Réchauffement climatique : quel impact sur la croissance ? » (mai 2024)

Cet article propose une synthèse de plusieurs études récentes. La figure 10-1 ci-dessous, présente deux graphiques :

- celui de gauche, extrait de l'AR5 du GIEC présente les impacts économiques en termes d'évolution de revenus en fonction du niveau de réchauffement global de la planète. On constate que les études postérieures à l'AR4 du GIEC présentent des résultats en moyenne bien plus conséquents en termes d'impacts économiques négatifs.
- celui de droite, extrait du rapport du NGFS de 2021 intitulé « NGFS Climate Scenarios », présente une autre liste de résultats d'études postérieures à l'AR5 du GIEC. On constate là aussi une augmentation très significative des impacts anticipés (supérieurs à 10 % du PIB en moyenne et jusqu'à 25 % pour l'une d'entre elles).

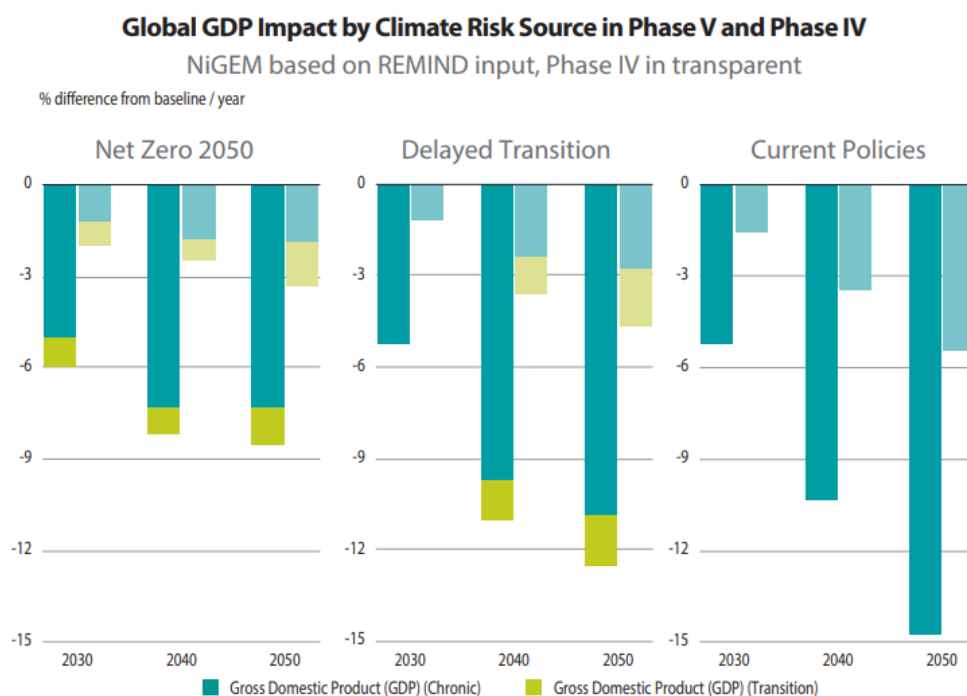


La figure suivante présente de la même manière les résultats de certaines études sur l'impact des risques climatiques physiques uniquement. On y constate le même type d'évolution historique, vers davantage d'impacts pour les études plus récentes.



2. NGFS : « NGFS long-term scenarios for central banks and supervisors » (novembre 2024) -

Ce rapport constitue la dernière version en date des scénarios économico-climatiques recommandés par le NGFS (2024) aux banques centrales et superviseurs. On constate désormais que les impacts économiques du changement climatique sont désormais évalués à près de 15 % de PIB en moins en 2050 par rapport au scénario sans changement climatique.

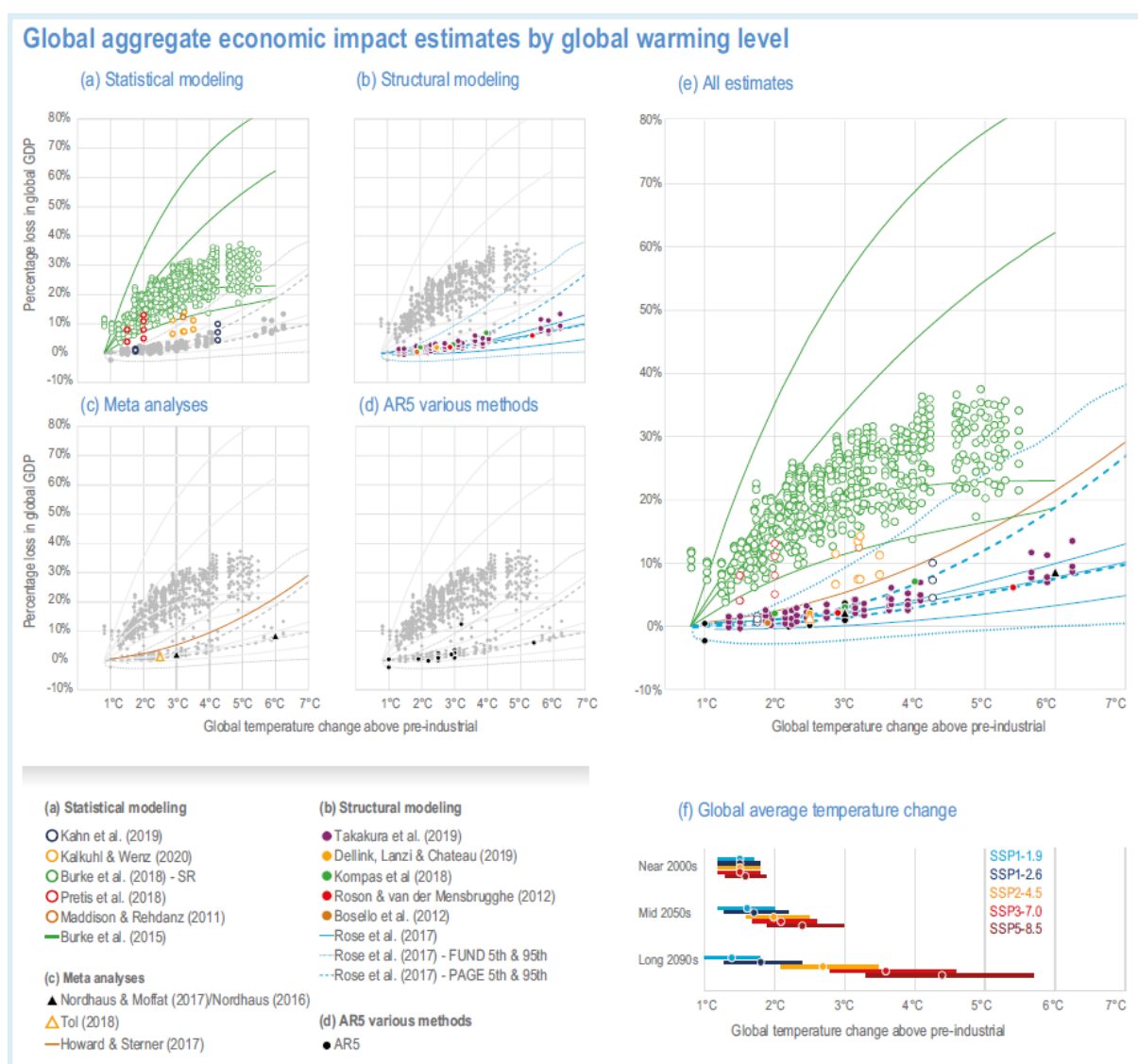


Note: The above figure shows how GDP is impacted across scenarios compared with a hypothetical (and impossible) baseline scenario in which no transition or physical risks occur. This baseline scenario represents a world in which climate change does not occur. Thus, climate change has a negative impact on GDP in every plausible scenario, but the magnitude of the losses differs across them.

Source : https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_scenarios_main_presentation.pdf (p. 31)

3. GIEC AR6 GT2

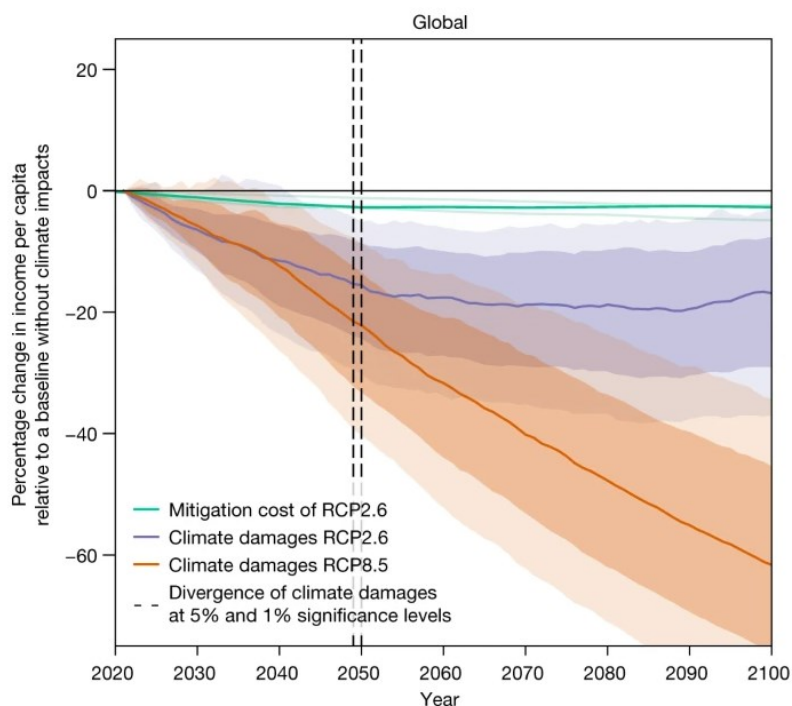
Dans le dernier rapport d'évaluation du GIEC (AR6 – GT2 – 2022), les graphiques ci-dessous sont présentés p. 2497, au sein de l'encart inter groupes de travail intitulé « Cross-Working Group Box ECONOMIC | Estimating Global Economic Impacts from Climate Change ». Ils illustrent les résultats d'une vingtaine d'études, en termes de perte de PIB en fonction du réchauffement global de la planète. On y retrouve notamment l'étude de Burke et al. de 2018 (figurant également dans les graphiques issus du site TheOtherEconomy au paragraphe 1 de cette annexe) qui présente un nuage de points en moyenne au-delà de 20 % de perte de PIB à +3 °C de réchauffement, et allant jusqu'à 30 %.



4. Article: Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. *Nature* 628, 551–557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>

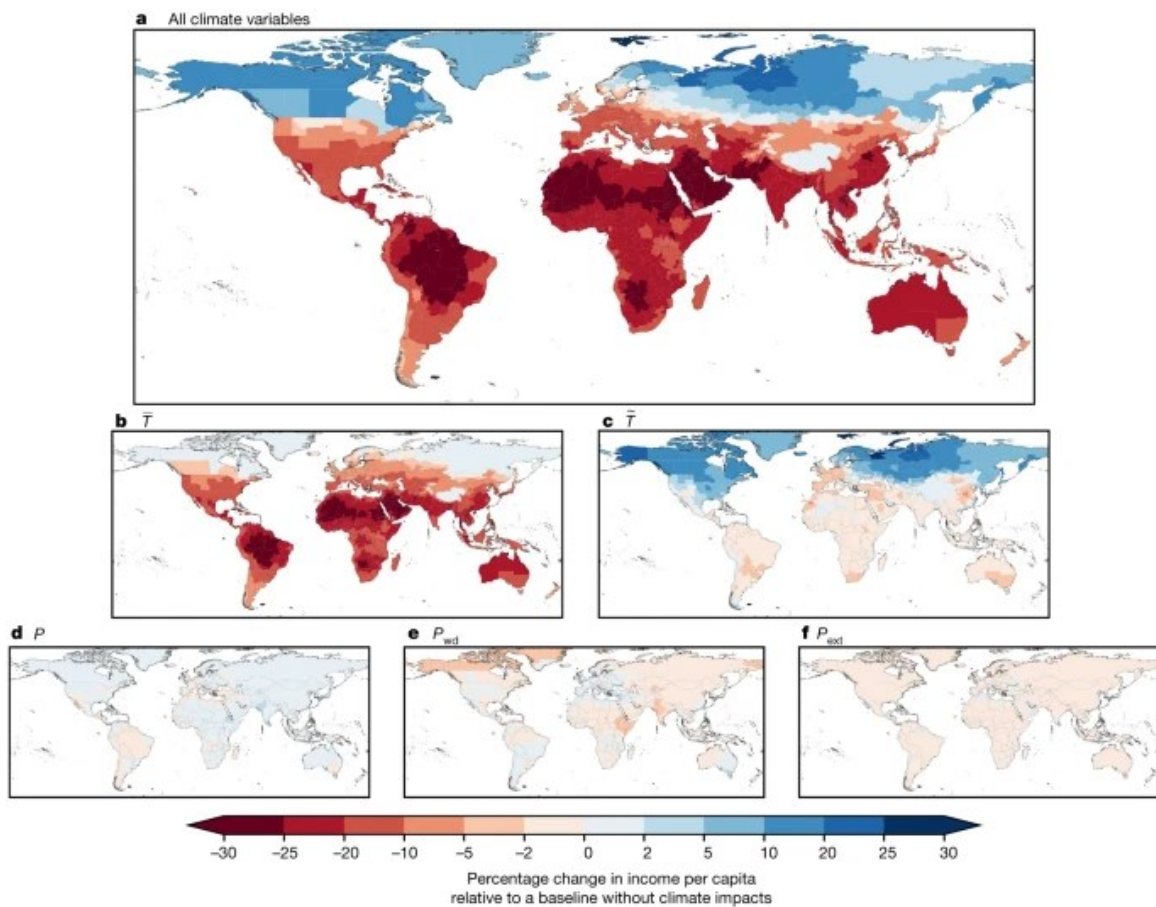
Cet article compare notamment l'impact estimé du changement climatique selon le scénario du GIEC RCP 2.6 (en termes de perte de PIB par rapport au scénario sans changement climatique) avec le coût de l'atténuation nécessaire à la tenue de ce scénario. Il présente également l'impact estimé du changement climatique pour le scénario RCP 8.5.

Fig. 1: The commitment and divergence of economic climate damages versus mitigation costs.



Cet article présente également la territorialisation des impacts économiques du changement climatique et montre qu'elle comporte d'importante variation selon les latitudes.

Fig. 2: The committed economic damages of climate change by sub-national region and climatic component.



5. NBER WORKING PAPER SERIES « THE MACROECONOMIC IMPACT OF CLIMATE CHANGE : GLOBAL VS. LOCAL TEMPERATURE » - Adrien Bilal, Diego R. Känzig (May 2024, Revised November 2024) :

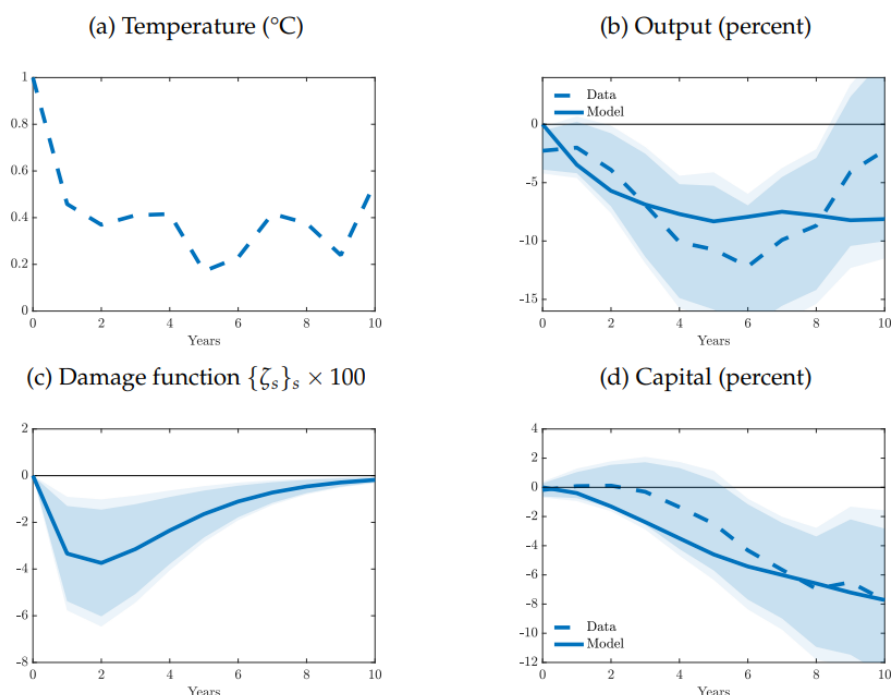
Cet article présente comme principale conclusion :

« a 1°C rise in global temperature causes global GDP to persistently decline, with a peak loss at 12%. This large effect is due to an associated surge in extreme climatic events. » (p. 44)

En cumulé, cela signifie que l'étude anticipe un impact avec un pic à 37 % de perte de PIB si la planète connaît un réchauffement de +3 °C (p. 39).

Ceci est illustré par les graphiques suivants :

Figure 13: Output, Capital and Productivity Global Temperature Shocks



Source : https://www.nber.org/system/files/working_papers/w32450/w32450.pdf (p. 39)

6. Etudes gouvernementales françaises récentes

La question de l'impact économique de la transition vers la neutralité carbone a fait l'objet en France de travaux accrus ces dernières années. Parmi les rapports de référence, on peut citer :

- le rapport sur les grands défis économiques, dont la lutte contre les dérèglements climatiques, par la commission internationale animée par Olivier Blanchard et Jean Tirole⁸⁴ ;
- le rapport sur les incidences économiques de l'action pour le climat, par Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz⁸⁵.

Plus récemment, la Direction générale du Trésor a annoncé un renforcement de ses capacités d'analyse sur le sujet, avec la création d'une sous-direction spécifiquement consacrée à la transition écologique. Celle-ci a notamment publié, après un rapport de décembre 2023⁸⁶, son rapport final sur les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone⁸⁷.

DG Trésor – Rapport sur les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone (2025)

Comme le souligne ce dernier rapport, les effets économiques du changement climatique pour la France sont encore insuffisamment connus.

⁸⁴ Juin 2021 - <https://www.strategie.gouv.fr/publications/grands-defis-economiques-commission-internationale-blanchard-tirole>

⁸⁵ Mai 2023 - https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/incidences-economiques-rapport-de-synthese_0.pdf

⁸⁶ Décembre 2023 - <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/ff6787fc-4f79-4b98-b3d4-e6ea0d6c8205/files/c5d56f29-e0a3-4a33-8bf3-a1770d96e25f>

⁸⁷ Janvier 2025 - <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/fe03c69a-9590-4368-b95e-ed761a023f53/files/5e8fa818-5c7d-48f5-aa60-c9ce4057b6b7>

Or, la mission estime que ceux-ci seront considérables, tant par les dommages directs de catastrophes dites à tort « naturelles » que par les impacts massifs sur les chaînes d'approvisionnement industrielles, sans compter les impacts et risques géopolitiques accrus. Si ce rapport estime aussi que les coûts de l'action sont plus faibles que les coûts de l'inaction, la mission estime qu'un tel raisonnement n'est valable qu'à l'échelle mondiale. Or, dans la situation actuelle très incertaine où les Etats-Unis se retirent à nouveau de l'Accord de Paris et où la politique énergétique est construite avec l'objectif principal d'accroître la production pétrolière et gazière, il apparaît de plus en plus que l'Union européenne risque d'être le continent dont les objectifs en termes d'atténuation sont les plus ambitieux, tout en étant également massivement affecté par le réchauffement lui-même.

Même si elles ne pourront que très partiellement permettre de faire face à ces dommages, celles-ci commencent à être identifiées. Leur coût sera considérable, impactant lui-même aussi largement l'économie. Les dépenses devront être priorisées, avec des indicateurs d'efficacité à construire, par analogie avec les coûts d'abattement pour les dépenses d'atténuation.

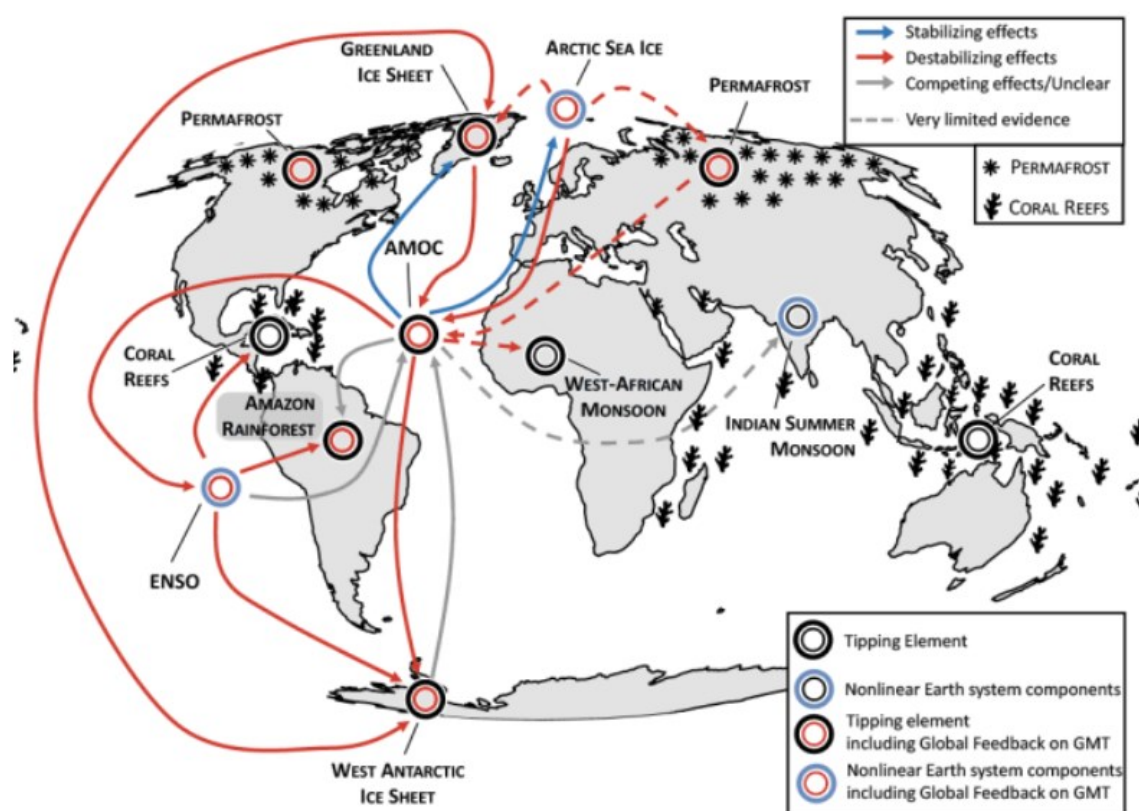
Annexe 9 : Approches sur les points de bascule climatiques

Définition des points de bascule

Les **points de bascule climatiques** sont des seuils critiques au-delà desquels un système climatique entre dans une dynamique de transformation **rapide, autonome et souvent irréversible**. Ces bascules peuvent résulter d'une **accumulation progressive** de perturbations ou d'un **événement déclencheur brutal** qui fait basculer le système dans un nouvel état d'équilibre, souvent plus chaud et moins favorable à la vie humaine.

D'après les travaux du **GIEC (AR6)** et du **Global Tipping Points Report 2023**, plusieurs systèmes climatiques et écosystémiques sont particulièrement vulnérables à ces bascules, et certains pourraient être atteints bien avant **2 °C** de réchauffement.

Graphique illustrant les interactions entre différents points de bascule



Source : Global tipping points report (2023) - [Global Tipping Points | 1.5.2.1 Interactions across scales in space and time](#)

Liste des principaux points de bascule identifiés

Les points de bascule concernent trois grandes catégories de systèmes :

A. Cryosphère (glaces et océans polaires)

Les régions polaires sont parmi les plus sensibles au réchauffement climatique, avec des impacts déjà visibles.

- **Effondrement des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique**

- Une fonte accélérée pourrait entraîner une **élévation du niveau des mers de plusieurs mètres** d'ici 2100, menaçant les populations côtières⁸⁸.

"Reconstructing past ice-sheet change and sea level rise can provide an analogue for sea level rise under tipping points. Around 125,000 years ago, when it was around 1°C warmer than today, it is estimated that global sea levels were around 6-9m higher than present ([Dutton et al., 2015](#)). Periods of very rapid sea level change have previously occurred, potentially up to 4m per century. These 'melt-water pulses' are thought to have occurred during periods of ice sheet collapse (International Cryosphere Climate Initiative, 2023)."

- L'étude retenue comme référence dans le rapport ([Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points | Science](#)) indique que le seuil critique pour le Groenland pourrait être atteint dès **1,5 °C**.

- **Fonte du pergélisol et libération massive de méthane**

- Le pergélisol contient des milliards de tonnes de **CO₂ et CH₄**, qui pourraient être libérées, créant un effet de **boucle de rétroaction positive**.

Selon l'étude de Nitzbon et al. (2023), les estimations de la libération de carbone du permafrost sont les suivantes :

Libération de carbone par le dégel graduel : On estime qu'environ 18 GtC (gigatonnes de carbone) par degré de réchauffement global pourrait être libéré à partir du dégel graduel du permafrost.

Libération de carbone par le dégel abrupt : Les processus de dégel abrupt, qui se produisent dans moins de 20 % des zones de permafrost, pourraient libérer entre 60 et 100 GtC d'ici 2300, en plus des 200 GtC libérés par le dégel graduel.

Ces estimations soulignent l'importance de la dynamique du permafrost dans le contexte du changement climatique, en mettant en évidence les risques associés à la libération de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), qui peuvent exacerber le réchauffement climatique.

- **Disparition de la banquise arctique en été**

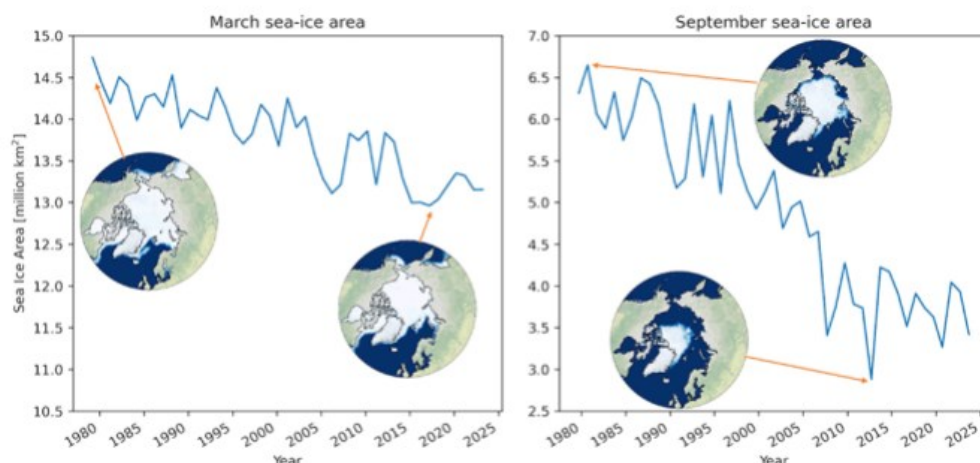
- Réduction de l'**albédo terrestre** (capacité de réflexion des rayons solaires), accélérant encore le réchauffement.

Évolution de la surface de la banquise arctique depuis 1979 et projections à 2100. « In summer, the retreating sea ice cover in the Arctic exposes the much darker ocean surface to the atmosphere, giving rise to the ice-albedo feedback : Less ice implies an additional uptake of heat, implying further ice loss. This mechanism was hypothesised to give rise to a nonlinear tipping point behaviour for the loss of Arctic summer sea ice (e.g., Lenton et al., 2008)⁸⁹."

⁸⁸ Today, modelling estimates that total loss of the Greenland Ice Sheet (GrIS) could lead to a total of 7.5m additional sea level rise (Morlighem et al., 2017). (page 43, Global Tipping Points Report 2023 [Global Tipping Points | Home](#))

⁸⁹ However, a large variety of studies based on both conceptual models and coupled Earth system models have provided convincing evidence that the summer ice-albedo feedback is compensated by damping feedbacks in winter that minimise the long-term memory of the Arctic summer sea ice cover.

Arctic sea ice evolution 1979-2023



Source : [Global Tipping Points | 1: Earth System Tipping Points \(Section 1 » Earth System Tipping Points » 1.2 » 1.2.2 » 1.2.2.2\)](#)

B. Biosphère (écosystèmes terrestres et marins)

• Effondrement de la forêt amazonienne

- Actuellement un **puits de carbone**, la forêt amazonienne pourrait se transformer en **source nette d'émissions de CO₂** en raison de la déforestation et du changement climatique.

"The potential for a tipping point in the Amazon – also known as 'Amazon dieback' – relates to the close coupling between the land ecosystem and the atmosphere, with the rainforest playing an important role in maintaining precipitation (and hence soil moisture) at levels sufficient to support rainforest ([Betts, 1999](#))."
([Global Tipping Points | 2.2.3.1 Amazon dieback](#))

- D'après une modélisation présentée dans le rapport, un dépassement prolongé de **2 °C** pourrait enclencher cette transition avec un impact significatif sur le réchauffement global de l'atmosphère.

"As an estimated upper bound of the contribution of the potential Amazon tipping point to the magnification of global climate change impacts, [Betts et al., \(2008\)](#) projected global warming by 2100 to be increased by 0.3°C in an extreme scenario of total Amazon forest die-back in which forest was almost entirely replaced by either grassland or desert"
([Global Tipping Points | 2.2.3.1 Amazon dieback](#)).

• Dégradation des écosystèmes coralliens et côtiers

- Les récifs coralliens sont **extrêmement sensibles aux vagues de chaleur océaniques**. Une hausse de température de **1,5 °C à 2 °C** pourrait entraîner la disparition de **90 % des coraux tropicaux**.

"While recovery from repeated bleaching events has been observed ([Palacio-Castro et al., 2023](#); [Obura et al., 2018](#)), the proposed global mean warming thresholds of 1.5 °C and 2 °C would result in widespread reef die-off (70-90 and 90-00 per cent respectively loss of coral reefs globally) ([Lough et al., 2018](#); [Schleussner et al., 2016](#); [Frieler et al., 2013](#)), and lower thresholds of 1.0-1.5 °C are argued for in this report (1.3.2.7)."
([Global Tipping Points | 1.5.2.5 Interactions between ENSO and tipping systems](#))

- Le rapport 2020 du PNUE [Projections of Future Coral Bleaching](#) (Projections des conditions futures du blanchiment des coraux) indique que les épisodes mondiaux de blanchiment pourraient devenir la norme au cours des décennies à venir à cause des changements climatiques.

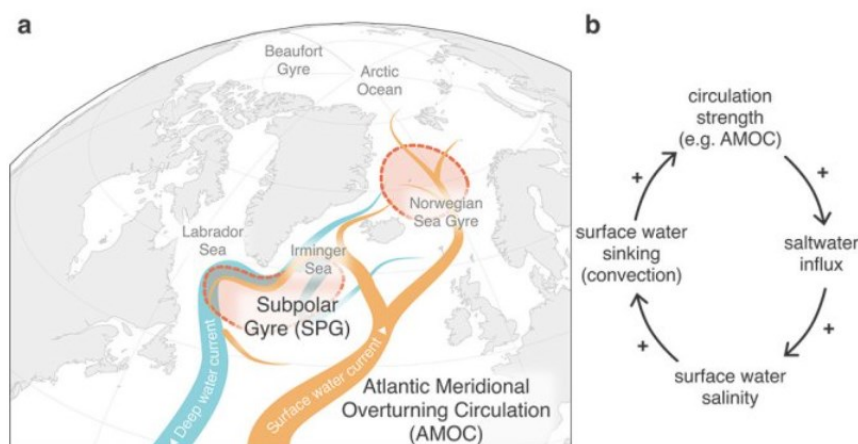
Le rapport estime que, faute d'une réduction rapide des émissions de carbone, la totalité des récifs coralliens du monde blanchiront avant la fin du siècle. D'ici à 2034, on s'attend à ce qu'un blanchiment grave se produise tous les ans. À ce rythme, toute récupération devient inconcevable à moins que les coraux ne s'adaptent aux températures plus élevées.

C. Circulations océaniques et atmosphériques

- **Affaiblissement de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (AMOC)**

- L'AMOC, dont fait partie le **Gulf Stream**, régule les températures en Europe et en Afrique.

Overview over the major oceanic circulation systems in the North Atlantic. **a** The surface currents (orange pathways) are connected to deep ocean currents (blue) through sites where dense (cold, salty) water sinks, driving the overturning circulation (pink shading). **b** One critical feedback is the salt-advection feedback, in which the circulation strength determines how well the convection works, which in turn benefits the circulation.



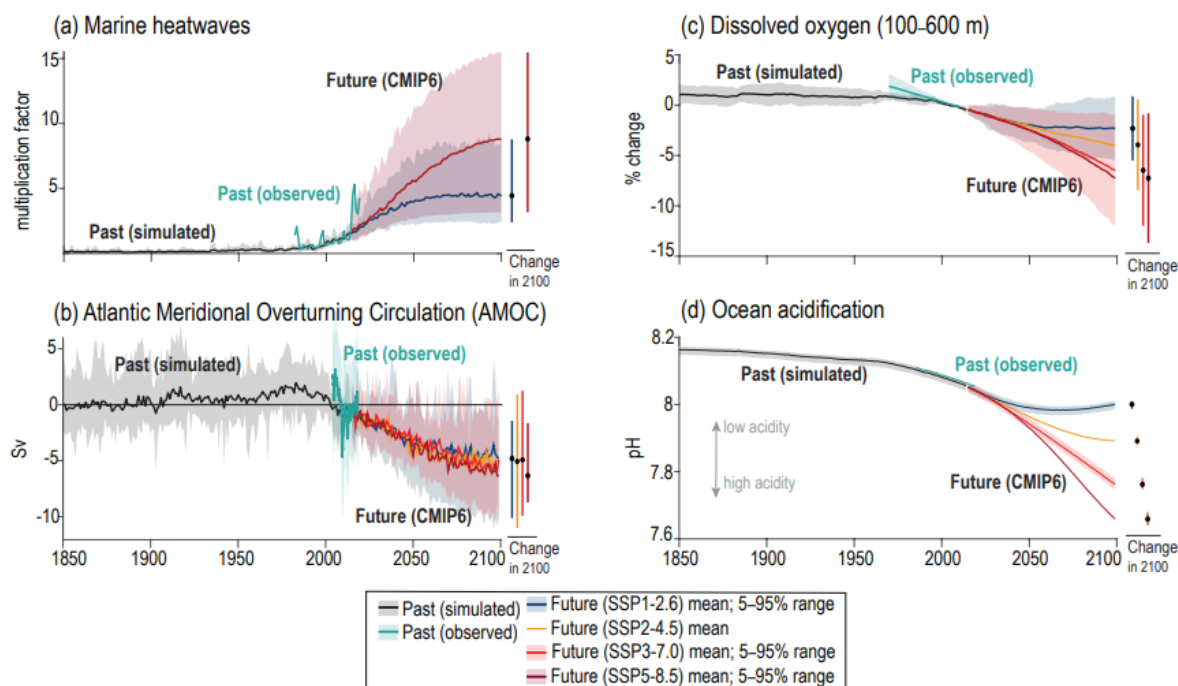
Source : [Global Tipping Points / 1.4.2.1 Atlantic circulation](#)

- Pour le GIEC, il est « *très probable* » que l'AMOC s'affaiblira au cours du 21^{ème} siècle quels que soient les scénarios d'émissions [ch 4.3.2.3]. Il prévoit une réduction de 25 à 50 % en 2100 selon le scénario adopté. Le GIEC n'a qu'une « confiance moyenne » dans le fait qu'il n'y aura pas d'« effondrement brutal » avant 2100.

"An AMOC decline over the 21st century is very likely for all SSP scenarios (Figure TS.11b)." (Working Group I (WGI) contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6) [Technical Summary](#))

Recent and Future change in the ocean

Marine heatwaves, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), Dissolved oxygen, and pH



Difficultés d'anticipation et incertitudes scientifiques

La détermination précise des seuils de déclenchement des points de bascule est entourée d'incertitudes en raison de la complexité des interactions climatiques et des limitations des modèles actuels.

Incertitudes associées aux seuils de déclenchement des points de bascule

1. Variabilité des estimations des seuils :

- Les estimations des seuils de déclenchement varient selon les études. Par exemple, McKay et al. (2022) suggèrent que plusieurs points de bascule pourraient être atteints entre 1,5 °C et 2 °C de réchauffement global, tandis que d'autres pourraient être déclenchés au-delà de 2 °C. Voir science.org

2. Limites des modèles climatiques :

- Les modèles climatiques actuels peinent à intégrer toutes les rétroactions et interactions complexes du système terrestre, ce qui limite la précision des projections concernant les points de bascule. Le **Global Tipping Points Report 2023** souligne la nécessité d'améliorer ces modèles pour mieux anticiper ces transitions critiques. Voir global-tipping-points.org

3. Données empiriques limitées :

- Le manque de données historiques détaillées sur les précédents changements climatiques abrupts rend difficile la validation des modèles et l'identification précise des seuils critiques. Le rapport du **GIEC AR6 Working Group I** reconnaît cette limitation, notant une confiance faible dans la quantification des changements de l'AMOC au 20^{ème} siècle en raison de désaccords entre les reconstructions et les simulations.

4. Influence des facteurs anthropiques :

- Les activités humaines introduisent des variables supplémentaires, telles que les émissions de gaz à effet de serre et les changements d'utilisation des terres, qui peuvent modifier les seuils de déclenchement des points de bascule. McKay et al. (2022) indiquent que le réchauffement actuel d'environ 1,1 °C au-dessus des niveaux préindustriels se situe déjà dans la fourchette inférieure de certains seuils d'incertitude des points de bascule, suggérant une influence humaine significative. Voir science.org

5. Interactions entre points de bascule :

- Les points de bascule ne sont pas isolés ; le déclenchement de l'un peut influencer ou entraîner d'autres, créant des effets en cascade difficiles à prévoir. Le **Global Tipping Points Report 2023** met en évidence ces interactions complexes et appelle à une compréhension approfondie pour informer les politiques climatiques. Voir global-tipping-points.org

Conséquences des dépassements de seuils climatiques

S'en remettre à la capture du carbone pour conserver une trajectoire qui ne mène pas à limiter l'augmentation de la température moyenne à +1,5 °C à la fin du siècle et suppose que nous serons capables de compenser un « excès d'émissions » (par rapport à la trajectoire qui mènerait à l'objectif de +1,5 °C) sur un temps nécessairement court (et qui le sera d'autant plus que nous serons restés en deçà de la trajectoire nécessaire de décarbonation de l'économie) est dangereux.

La compensation des émissions porte le risque que les efforts à consentir pour réduire les émissions soient perçus comme moins nécessaires et urgents.

"The development of removal approaches also requires careful governance to avoid their use as a substitute for achievable mitigation, rather than a supplement. One analysis of the risk of mitigation deterrence through carbon removal estimates as much as 1.4°C additional warming (over the 1.5°C goal) could result. ([McLaren, 2020](#)). »

A ce stade, les scénarios retenus par le GIEC pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris prennent déjà en compte une contribution de la compensation et par conséquent de toutes les solutions capables de délivrer des « émissions négatives ».

Dans cette perspective, les puits de carbone naturels doivent être non seulement préservés mais peuvent aussi par leur restauration (mangroves) voire extension (reboisement) permettre d'accroître la capture séquestration du CO₂. Développer ces « nature based solutions » ([UNEP and nature-based solutions | UNEP - UN Environment Programme](#)) est nécessaire ne serait-ce que pour « compenser les émissions les plus difficiles à supprimer (IFC : [Decarbonization of Hard-to-Abate Sectors](#))

"It is important to recognise that carbon removal is understood as playing two roles. First, it can balance residual, recalcitrant emissions in a net-zero state. The currently projected scale of such residuals and removals is substantial at close to 20 percent of current emissions ([Buck et al., 2023](#)). The second role is to reverse overshoot of carbon budgets (reducing ultimate outcome temperatures). The more removal capacity required for the first task, the greater the challenge of providing sufficient, rapid, sustainable capacity for the second. ([Global Tipping Points | 3.2.3.3 Carbon dioxide removal](#))"

Les solutions « technologiques » (i.e. ne reposent pas sur une meilleure mobilisation du potentiel de la nature) sont, elles, des paris que l'état de la science ne permet pas à ce stade de considérer comme des réponses acceptables, même si cela ne doit pas conduire à abandonner toute recherche pour explorer leurs possibilités ne serait-ce que parce que les scénarios retenus par le GIEC pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris prennent déjà en compte une contribution de ces techniques.

Les motifs d'inquiétude peuvent être recensés comme suit :

1. Surestimation des technologies de capture du CO₂

Bien que les technologies de captage et stockage du carbone (CDR) soient vues comme une solution potentielle pour limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, leur efficacité à grande échelle reste incertaine.

Selon une étude citée dans le rapport, ces technologies ne sont pas encore matures et ne peuvent pas être déployées de manière à compenser les émissions mondiales à court terme. En conséquence, les scénarios qui dépendent de ces technologies risquent d'être surévalués.

2. Irréversibilité de certaines bascules climatiques

Le dépassement des seuils critiques de température pourrait entraîner des changements climatiques irréversibles. Voici quelques exemples clés :

- **Fonte des glaciers** : Ce phénomène pourrait ne pas être inversé à court ou moyen terme. La perte de glace affecte non seulement le niveau des mers, mais aussi des écosystèmes et des communautés humaines, en particulier celles situées dans des zones à forte dépendance de l'eau douce des glaciers.
- **Ralentissement de l'AMOC (circulation méridienne de retournement de l'Atlantique)** : l'AMOC joue un rôle fondamental dans la régulation du climat mondial, en particulier les températures dans l'hémisphère nord. Un affaiblissement prolongé de cette circulation pourrait modifier de manière significative les régimes climatiques, en entraînant une hausse des températures en Europe et un refroidissement dans d'autres régions, affectant ainsi les systèmes météorologiques mondiaux.

Les technologies de captage et stockage du carbone (CDR) sont souvent mises en avant comme solutions permettant de compenser les émissions excessives. Parmi les principales techniques proposées, on trouve :

- **La bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS)** : cela implique la production d'énergie à partir de biomasse, avec captage et stockage du CO₂. Cependant, des inquiétudes existent concernant la disponibilité de terres agricoles pour cette biomasse et le potentiel de stockage à long terme.
- **L'aspiration directe de l'air (DAC)** : ces systèmes aspirent le CO₂ de l'air ambiant et le stockent sous terre ou l'utilisent à d'autres fins. Cependant, les coûts énergétiques et la mise en œuvre à grande échelle posent de sérieux défis.
- **Le sol et les océans** : des solutions de gestion des sols et des océans, telles que l'augmentation du stockage de carbone dans les sols ou la fertilisation des océans, sont également étudiées, bien qu'elles soient limitées par leur efficacité et des effets écologiques incertains.

Des **études récentes** alertent sur plusieurs dangers des scénarios reposant sur le CDR :

- **Surestimation de l'efficacité** : une étude du **GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change)** souligne la forte incertitude concernant la capacité de ces technologies à capter suffisamment de CO₂ à grande échelle pour inverser les effets du réchauffement.
- **Risques environnementaux et sociaux** : l'**International Energy Agency (IEA)** a également émis des avertissements concernant les effets collatéraux du CDR, notamment la concurrence pour les ressources naturelles et les impacts écologiques sur les écosystèmes locaux.
- **Engagements politiques et économiques** : la **World Resources Institute (WRI)** et le **Carbon Capture Coalition** ont indiqué que ces technologies ne doivent pas être utilisées comme substitut à des réductions immédiates et drastiques des émissions.

La communauté scientifique met donc en garde contre une trop grande dépendance à ces solutions sans prioriser la réduction directe des émissions de CO₂.

Si les seuils d'élévation de la température moyenne à partir desquels on entre dans la plage de déclenchement des points de bascule comme la durée nécessaire à la réalisation du basculement restent entourés de beaucoup d'incertitudes comme cela a été exposé dans le rapport et par de multiples travaux (dont celui retenu comme document de référence par le rapport : [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points | Science](#)), la non réversibilité des conséquences de la réalisation de certains points de bascule doit inciter à n'envisager le recours aux solutions « technologiques » pour gérer un éventuel overshoot qu'avec la plus grande prudence.

"The irreversibility of tipping processes is the characteristic that creates most concern among decision makers ([Milkoreit, 2019](#)), likely because it has important implications for impact governance."

"First, the irreversible, structural changes associated with the crossing of ESTPs (Earth system tipping points) imply that **loss and damage provisions will play a much greater role** than currently recognised. Environmental conditions for human existence will be permanently altered at large scales, and current conditions – ecosystems, landscapes, natural resources, and the associated human uses and experiences of nature – will be lost.

Second, current climate change adaptation approaches might not be adequate to deal with the effects of ESTPs. Current climate adaptation frameworks focus on "reducing climate risks and vulnerability mostly via adjustment of existing systems" ([IPCC, 2022b](#)). "

Annexe 10 : Capacité de stockage du CO₂ dans le bois

Tableau comparatif des essences de bois **Pin de Monterey**, **Chêne européen** et **Hêtre**, intégrant des données chiffrées et leurs sources :

Critères	Pin de Monterey	Hêtre	Chêne européen
Densité (kg/m ³ , sec)	500-550	650-720	700-750
Carbone stocké (tonnes CO ₂ /m ³)	0,92-1,01	1,20-1,32	1,29-1,38
Durabilité naturelle	Faible (classe 4)	Moyenne (classe 3)	Élevée (classe 2)
Croissance (annuelle)	Rapide (15-20 ans)	Moyenne (40-60 ans)	Lente (~150 ans)
Usages principaux	Construction, papier	Mobilier, contreplaqué	Mobilier, parquet

Sources :

1. **Densité et durabilité naturelle** : [Hout Info Bois](#)
 - Les données sur la densité et la durabilité naturelle des essences de bois sont issues du guide « Bois : Guide pour le bon usage » publié par Hout Info Bois.
2. **Carbone stocké** : [memento_2020.pdf](#)
 - Le calcul du carbone stocké est basé sur l'information selon laquelle 1 m³ de bois sec contient environ 250 kg de carbone, ce qui correspond à 0,92 tCO₂ capturé. Cette estimation est couramment utilisée dans les études sur le stockage de CO₂ dans le bois.
3. **Croissance et usages principaux** : [CNPf Île-de-France](#)
 - Les informations sur la croissance des essences et leurs usages principaux sont détaillés dans le « Schéma Régional de Gestion Sylvicole » publié par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPf).

Explications :

- **Densité** : La densité du bois, exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m³), influence directement sa résistance mécanique et sa capacité à stocker du carbone ;
- **Carbone stocké** : Le calcul du carbone stocké est basé sur la densité du bois et la proportion de carbone dans la matière sèche. Par exemple, pour une densité de 500 kg/m³, le carbone stocké est estimé à 0,92 tonne de CO₂ par mètre cube.
- **Durabilité naturelle** : Classée selon la norme NF EN 350, la durabilité naturelle indique la résistance du bois aux agents biologiques sans traitement ;
- **Croissance** : Le temps nécessaire pour qu'un arbre atteigne une taille exploitable varie selon l'essence, influençant ainsi la gestion forestière et la disponibilité des ressources ;
- **Usages principaux** : Les propriétés physiques et mécaniques de chaque essence déterminent ses applications courantes, telles que la construction, le mobilier ou la production de papier.

Le tableau ci-dessus met en évidence les différences entre ces essences en termes de propriétés physiques, de croissance et d'applications, fournissant ainsi des informations utiles pour le choix du bois en fonction des besoins spécifiques.

Annexe 11 : Les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) du bois

Les **Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES)** pour les matériaux à base de bois mentionnent plusieurs aspects essentiels liés à la durabilité et à l'impact environnemental des produits de construction. Voici les principaux points considérés :

1. Gestion durable des forêts :

- La FDES indique si le bois utilisé provient de forêts gérées durablement, certifiées par des labels tels que **PEFC** (Programme for the Endorsement of Forest Certification) ou **FSC** (Forest Stewardship Council) ;
- Cela « garantit » une exploitation raisonnée et le reboisement des parcelles exploitées.

2. Cycle de vie et stockage du carbone :

- Le bois est reconnu pour son rôle dans la **séquestration du carbone**. La FDES précise la quantité de CO₂ capturée et stockée pendant la durée de vie du matériau.
- La décomposition ou la fin de vie du bois est également abordée, avec un calcul des émissions associées.

3. Origine et traçabilité :

- La fiche peut indiquer l'origine géographique du bois, assurant une transparence sur les circuits d'approvisionnement ;
- Elle encourage l'utilisation de bois locaux pour réduire l'empreinte carbone liée au transport.

4. Impact environnemental global :

- Les FDES détaillent les résultats d'une **Analyse de Cycle de Vie (ACV)**, qui inclut des indicateurs comme les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie primaire, et les impacts sur les ressources naturelles.

5. Substances nocives :

- Elles vérifient la présence éventuelle de substances chimiques ajoutées (colles, traitements, etc.) et leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Vérifications nécessaires :

- **Certification de durabilité forestière (PEFC, FSC)** pour s'assurer que le bois provient de sources responsables ;
- Respect des seuils d'émissions de composés organiques volatils (COV) ;
- Validation des indicateurs environnementaux de l'ACV (impacts sur l'air, l'eau, les sols) ;
- Conformité des déclarations à la norme **NF EN 15804** et à la méthode réglementaire pour les FDES.

Ces points permettent de garantir que le bois utilisé comme matériau de construction répond aux exigences de durabilité et d'impact environnemental réduit.

Pour le **bois de construction** et le **bois de charpente**, plusieurs FDES sont disponibles, notamment pour les **murs ossature bois**, les **charpentes traditionnelles**, les **charpentes industrielles**, les **poutres en I**, les **panneaux CLT**, le **bois lamellé-collé (BLC)** et les **planchers bois**.

Ces fiches peuvent être consultées et téléchargées via le configurateur **DE-bois**⁹⁰, qui permet d'adapter les FDES collectives à des projets spécifiques ou de les individualiser pour un fabricant particulier.

Pour le **bois destiné à la filière des matériaux**, le configurateur **DE-boisdefrance.fr** offre la possibilité de configurer des FDES collectives en fonction des spécificités d'un chantier ou d'un produit défini, améliorant ainsi la traçabilité des produits bois dans un projet.

Ces outils facilitent l'accès aux informations environnementales et sanitaires des produits en bois, contribuant à des choix éclairés dans les projets de construction.

Les fiches FDES répondent au besoin d'une analyse détaillée **par matériau ou composant de construction**, notamment pour :

- **Charpente** : ACV spécifique pour le bois massif, lamellé-collé ou contrecollé.
- **Parquet** : ACV pour les parquets massifs ou stratifiés.
- **Isolants** : ACV pour les panneaux isolants en fibres de bois ou autres formes.
- **Panneaux** : ACV pour les contreplaqués, panneaux OSB, ou panneaux de particules.

Caractéristiques des FDES :

- Elles sont normalisées selon les standards européens (norme NF EN 15804).
- Elles couvrent tout le cycle de vie des produits : extraction, transformation, utilisation, fin de vie.
- Disponibles dans la **Base INIES**
- **INIES**, elles permettent de comparer l'impact environnemental des produits pour chaque usage.

Les FDES fournissent :

- Des données détaillées sur l'empreinte carbone et les autres impacts environnementaux (énergie grise, consommation d'eau, etc.).
- Une base pour comparer des matériaux biosourcés (comme le bois) à des matériaux conventionnels (béton, acier, plastique).
- Une granularité suffisante pour évaluer l'impact de chaque composant dans une construction (par exemple, comparer les poutres en bois et en acier pour une charpente).

⁹⁰ DE-bois regroupe les **FDES** (fiches de déclaration environnementale et sanitaire) des **produits de construction en bois fabriqués en France** ([DE-bois.fr](https://de-bois.fr))