

La valeur de l'action pour le climat

Une référence pour évaluer et agir

Rapport de la commission présidée par

Alain Quinet



LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

UNE RÉFÉRENCE POUR ÉVALUER ET AGIR

Rapport de la commission présidée par

Alain Quinet

Coordinateur

Nicolas Riedinger

Rapporteurs

Jules Bourgueil (CGDD), Logan Gourmand (DG Trésor), Boris Le Hir (CGDD),
Aude Pommeret (France Stratégie), Alice Robinet (France Stratégie)



FRANCE STRATÉGIE

MARS 2025



AVANT-PROPOS

L'Union européenne et la France se sont fixé des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, jusqu'à la neutralité carbone à l'horizon 2050. Leur atteinte suppose une planification écologique à la fois ambitieuse et réaliste, que France Stratégie s'attache à éclairer à travers différentes analyses.

Après les évaluations des coûts d'abattement sectoriels dans le cadre de la commission Cricqui et les analyses plus macroéconomiques du rapport Pisani-Ferry et Mahfouz, le rapport de la commission sur la valeur de l'action pour le climat, présidée par Alain Quinet et composée de près d'une trentaine d'experts venus de tous horizons, met à jour la trajectoire de valeur du carbone.

Cette valeur constitue une référence visant à s'assurer que l'on se met sur le « bon chemin » au meilleur coût. Comme le rappelle le rapport, elle ne doit pas être confondue avec un niveau souhaitable ou optimal de taxe carbone. Sa vocation première est d'aider à identifier et ordonner dans le temps les actions de décarbonation les plus pertinentes et à valoriser les impacts carbone des projets d'investissements. Elle ne préjuge pas du bon dosage des différents instruments de la politique climatique – tarification, réglementation, subventions –, qui nécessite de compléter l'analyse de la rentabilité socioéconomique des actions de celle des enjeux de redistribution et de compétitivité.

La troisième Stratégie nationale bas carbone, qui doit être officiellement adoptée par le Gouvernement dans les prochains mois, va sensiblement renforcer l'objectif de réduction de nos émissions à l'horizon 2030, en cohérence avec la cible européenne de baisse de 55 % des émissions nettes par rapport à 1990. La nouvelle trajectoire de valeur d'action pour le climat proposée dans ce rapport, en revalorisant les efforts initiaux, a pour but de nous mettre sur la voie du respect de cet objectif et, à plus long terme, de la neutralité carbone en 2050.

Le cadre d'analyse dont s'est ainsi doté la France est unique au sein de l'Union européenne. Dans un contexte où la dimension européenne de nos politiques climatiques est de plus en plus importante, le prochain défi est d'étendre et d'adapter ce cadre au niveau communautaire.

Clément Beaune,
commissaire général de France Stratégie et haut-commissaire au Plan



SOMMAIRE

Résumé pour les décideurs	9
Principaux résultats et enseignements	13
Introduction	27
Chapitre 1 – Les objectifs climatiques et les enjeux de la transition vers la neutralité carbone	29
1. Bilan et perspectives de l’action pour le climat : l’état se resserre	29
1.1. Au niveau mondial, une dérive continue des émissions de gaz à effet de serre, malgré une baisse d’un tiers depuis 1990 en Europe	30
1.2. Les effets déjà visibles du réchauffement climatique	35
1.3. Un budget carbone mondial en épuisement rapide	37
1.4. Des objectifs de décarbonation européens et français plus ambitieux à l’horizon 2030	42
1.5. Des incertitudes et des avancées	45
2. L’enjeu de la valorisation des émissions de gaz à effet de serre	52
2.1. Deux approches de valorisation du carbone : coûts-bénéfices et coûts-efficacité.....	52
2.2. L’approche coûts-efficacité : optimisation d’un budget carbone ou respect d’une trajectoire de flux	54
2.3. L’approche coûts-bénéfices : les progrès réalisés dans la valorisation des dommages	58
2.4. Une tendance à la hausse des estimations de coût social du carbone	60
2.5. L’estimation des valeurs carbone dans l’approche coût-efficacité	63
2.6. Les coûts d’abattement sectoriels en France	66

Chapitre 2 – La nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat	69
1. Les motifs de révision de la trajectoire : un changement de contexte par rapport à la précédente commission	69
2. Les éléments de modélisation choisis pour éclairer les trajectoires possibles de la valeur de l'action pour le climat	71
2.1. La mobilisation de modèles dédiés à l'analyse de la transition climatique	71
2.2. Un cadrage des scénarios cohérent avec la SNBC	74
3. Résultats des simulations selon les deux approches « flux » et « budget carbone »	82
3.1. Les simulations en flux	82
3.2. Les simulations en budget carbone.....	85
3.3. Synthèse des simulations centrales.....	92
4. Des simulations soumises à des incertitudes	94
4.1. La sensibilité aux hypothèses technologiques	96
4.2. La sensibilité aux hypothèses de puits	97
4.3. La sensibilité aux hypothèses de prix du pétrole	98
4.4. La sensibilité aux hypothèses de coopération internationale	101
4.5. La sensibilité aux hypothèses de sobriété	102
4.6. La sensibilité aux hypothèses de croissance économique	104
4.7. Synthèse des incertitudes.....	104
5. Ces travaux aboutissent à une nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat	106
5.1. Les ingrédients de construction de la nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat.....	106
5.2. La nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat	108
5.3. La prolongation de la trajectoire retenue par la commission après 2050	111
Chapitre 3 – Les usages de la valeur de l'action pour le climat	113
1. Les usages publics de la valeur de l'action pour le climat	113
1.1. L'analyse de la rentabilité socioéconomique des investissements publics.....	114
1.2. La comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat.....	123
1.3. Le calibrage des mesures de politiques publiques.....	128
1.4. Une estimation agrégée des efforts climatiques	133

1.5. Pour une valeur de l'action pour le climat européenne.....	138
2. Les usages « privés » de prix du carbone.....	139
2.1. L'usage de la valorisation du carbone pour guider les choix de financement des projets de décarbonation : l'exemple de la Banque européenne d'investissement.....	139
2.2. La définition d'un prix interne du carbone comme appui aux stratégies de décarbonation des entreprises	141
Recommandations de la commission.....	147
ANNEXES	
Annexe 1 – Lettre de mission.....	151
Annexe 2 – Composition de la commission	153
Annexe 3 – Auditions et organismes consultés.....	155
Annexe 4 – Compléments au rapport (à paraître).....	157
Annexe 5 – Description des modèles utilisés dans le cadre de la commission	159
Annexe 6 – Compléments sur le modèle TITAN.....	169
Bibliographie.....	171



RÉSUMÉ

POUR LES DÉCIDEURS

Le référentiel d'évaluation socioéconomique dont s'est doté l'État français au lendemain de la Seconde guerre mondiale, sous l'égide du Commissariat général du Plan, fait l'objet d'un travail continu de perfectionnement et de mise à jour. C'est dans ce cadre que le présent rapport, fruit d'un travail collégial réunissant à France Stratégie plus d'une trentaine d'experts de tous horizons¹, actualise la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat.

La valeur de l'action pour le climat constitue une mesure monétaire du chemin à parcourir pour atteindre les objectifs ambitieux de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) à moindre coût : une baisse de 50 % des émissions brutes de gaz à effet de serre (par rapport à 1990) en 2030 et la neutralité carbone à l'horizon 2050, c'est-à-dire l'équilibre entre émissions anthropiques de gaz à effet de serre et absorption par les puits.

La valeur de l'action pour le climat prend la forme d'une trajectoire pluriannuelle, car c'est nécessairement dans une logique de long terme que les actions de décarbonation se conçoivent, se déploient et doivent être valorisées. Sans cadre de long terme, les actions de décarbonation risquent en effet d'être sujettes à des mouvements de *stop and go* ou d'être rendues plus coûteuses si les ménages et entreprises sont « pris de court » par une mauvaise anticipation des transformations à conduire.

1. La nouvelle trajectoire de la valeur pour le climat reflète le relèvement du niveau d'ambition à l'horizon 2030 retenu par la SNBC 3

Plus l'objectif de décarbonation est ambitieux, plus la valeur de l'action pour le climat est élevée, dans la mesure où les solutions décarbonées sont généralement plus coûteuses que les solutions carbonées.

¹ Voir en [Annexe 1](#) la lettre de mission, en [Annexe 2](#) la composition de la commission et en [Annexe 3](#) la liste des personnes et organismes consultés.

L'objectif « zéro émission nette » (ZEN) fondait la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat de 2019. Cet objectif ambitieux continue de guider la nouvelle trajectoire. Dans ce cadre :

- 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 climat¹ ;
- 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. En accordant ainsi la même valeur actualisée à une tonne de CO₂e abattue aujourd'hui ou demain, on s'assure que les gains carbone de long terme des projets de décarbonation (et symétriquement le coût des émissions éventuelles de projets visant d'autres objectifs) ne sont pas écrasés par l'actualisation.

Enfin, même si l'objectif ZEN est atteint en 2050, ce n'est pas « la fin de l'histoire ». La demande d'énergie continuera d'être soutenue, des énergies fossiles seront toujours disponibles et la capacité à stocker les émissions résiduelles restera limitée. Il convient donc, en prolongeant la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat au-delà de 2050 (croissante jusqu'en 2060, stable au-delà), de s'assurer contre tout risque de retour en arrière.

2. Atteindre au moindre coût des objectifs ambitieux : tel est le meilleur usage qui peut être fait de la trajectoire de la valeur pour le climat

L'Europe et la France peuvent se targuer de premiers résultats positifs, avec une baisse des émissions de gaz à effet de serre de plus de 30 % depuis 1990 – dans un contexte où l'augmentation des émissions mondiales hélas ne se dément pas. Mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour se mettre sur une trajectoire ZEN.

Le relèvement de la valeur de l'action pour le climat en début de période a précisément pour but de revaloriser les efforts précoces, qu'ils soient publics ou privés. Si la valeur de l'action pour le climat est de 256 euros en 2025, cela signifie au premier ordre que toutes les actions d'atténuation coûtant moins de 256 euros la tonne de CO₂e abattue méritent d'être engagées.

¹ France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat*, rapport à la Première ministre, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, mai.

Il faut relever le niveau d'effort, mais aussi, comme les travaux de la commission sur les coûts d'abattement présidés par Patrick Criqui l'ont bien montré¹, soigneusement sélectionner les actions et les mesures :

- il existe une très forte hétérogénéité des coûts d'abattement des émissions de CO₂e entre les secteurs et, surtout, au sein de chaque secteur ;
- le choix des actions (et des mesures visant à les déclencher) doit s'inscrire dans une perspective de long terme, pour éviter notamment que des actions permettant d'obtenir des réductions immédiates de CO₂e viennent « verrouiller » des technologies peu efficaces et évincer des solutions plus structurantes à long terme.

Dans un tel contexte, la valeur de l'action contribue à éclairer les choix, même si des évaluations complémentaires sont nécessaires pour prendre la pleine mesure des enjeux redistributifs ou des impacts industriels de ces choix.



Si les incertitudes sur les technologies et les comportements restent bien évidemment importantes, l'élaboration d'une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat s'est « fiabilisée » au fil du temps, grâce à une meilleure compréhension des technologies mobilisables et des investissements collectifs capables de promouvoir une plus grande sobriété des usages, grâce aussi aux progrès de la modélisation économique de la transition écologique. La présente trajectoire est le fruit d'une délibération collective, éclairée par la littérature académique et les simulations réalisées par des modèles différents et complémentaires.

À l'heure où l'administration Trump démantèle les outils d'évaluation socioéconomique dédiés au climat, la France est aujourd'hui l'un des rares pays dans le monde à disposer d'un référentiel d'évaluation des politiques publiques de décarbonation complet et régulièrement mis à jour. Il doit être davantage utilisé car il n'y a pas de bonne planification écologique sans bonne évaluation.

¹ Voir la page dédiée à la commission Criqui [sur le site de France Stratégie](#).



SYNTHÈSE

PRINCIPAUX RÉSULTATS ET ENSEIGNEMENTS

L'ambition européenne et française est d'atteindre l'objectif « zéro émission nette » (ZEN) en 2050, les émissions brutes résiduelles ayant vocation à être compensées par les puits de carbone que sont notamment les sols, les forêts et progressivement les dispositifs technologiques de capture et de séquestration du carbone.

L'Europe et la France peuvent se targuer de premiers résultats positifs, avec une baisse des émissions de gaz à effet de serre de plus de 30 % depuis 1990, dans un contexte où les émissions mondiales n'ont cessé d'augmenter. Des efforts supplémentaires sont cependant nécessaires pour tenir les objectifs que nous nous sommes fixés. Dans ce cadre, la valeur de l'action pour le climat représente le niveau d'effort que la société doit assumer pour atteindre la neutralité carbone ; elle représente corrélativement la valeur que la collectivité accorde à chaque tonne de CO₂e abattue.

La poursuite de l'objectif « ZEN », les actions qu'elle requiert et les bénéfices environnementaux que cet objectif procure s'il est partagé par un nombre suffisant de grands pays sur la planète ne sont pas spontanément pris en compte dans les choix des acteurs publics et privés. Une planification écologique est nécessaire, fondée sur une évaluation robuste des projets, pour s'assurer que l'on se met sur le « bon chemin » au meilleur coût. Dans cette perspective, la valeur de l'action pour le climat est une référence pour éclairer les choix, donner une valeur monétaire aux investissements de décarbonation, définir le périmètre des actions rentables et calibrer les mesures permettant de déclencher ces actions. À ce titre, elle répond à une exigence de la Stratégie nationale bas carbone, qui doit définir « un cadre économique de long terme, en préconisant notamment une valeur tutélaire du carbone et son utilisation dans le processus de prise de décisions publiques¹ ».

¹ Article L221-B du Code de l'environnement.

Encadré I – Les trois « prix » du carbone

Le terme de « prix du carbone » peut recouvrir des réalités différentes. On en distingue traditionnellement trois.

- **La valeur de l'action pour le climat (VAC).** Historiquement appelée « valeur tutélaire du carbone », elle incarne la valeur que la collectivité doit donner aux actions publiques et privées permettant d'abattre une tonne d'équivalent CO₂e. Elle s'inscrit dans une logique coût-efficacité, déterminant comment atteindre un objectif donné à moindre coût.
- **Le coût social du carbone.** Il représente la valeur actualisée des dommages marginaux futurs d'une tonne d'équivalent CO₂e émise aujourd'hui. Il s'inscrit dans une approche coûts-bénéfices – le niveau d'émissions optimal étant celui qui égalise coût d'abattement marginal et dommage marginal.
- **La tarification explicite du carbone.** Prenant la forme de taxes ou de marchés de quotas, la tarification fait partie des incitations publiques contribuant à décentraliser les actions de décarbonation privées. Les tarifications explicites du carbone en vigueur s'inscrivent généralement à des niveaux inférieurs, voire très inférieurs, aux prix fictifs du carbone que sont la valeur de l'action pour le climat et le coût social du carbone.

En d'autres termes, la valeur de l'action pour le climat n'est pas une taxe mais une référence (un « prix fictif ») pour définir le périmètre et l'intensité des actions permettant d'atteindre les objectifs au moindre coût.

1. Une valeur de l'action pour le climat fondée sur des engagements ambitieux

La valeur de l'action pour le climat synthétise le niveau des efforts à engager et à valoriser pour atteindre les objectifs fixés, en prenant en compte non seulement la quantité d'émissions à abattre mais aussi le coût marginal des leviers mobilisables au cours du temps pour y parvenir.

La détermination de cette valeur s'affranchit d'une évaluation des dommages liés au changement climatique et des points de bascule éventuels, en se fondant directement sur un objectif politique. Elle doit assumer l'existence d'incertitudes, croissantes dans le temps, sur le potentiel et le coût des technologies de décarbonation mobilisables, sur les changements de comportement ainsi que sur le potentiel d'émissions négatives.

Il existe plusieurs façons de mettre en œuvre l'approche coûts-efficacité, selon la manière dont sont formulés les objectifs de décarbonation et les contraintes que l'on se donne pour les atteindre. On peut distinguer deux cas polaires : un objectif formulé en budget carbone et un objectif formulé en trajectoire de réduction des émissions.

Le premier cas est celui où l'objectif fixé s'exprime en budget carbone, c'est-à-dire en un stock d'émissions cumulées maximal autorisé pour rester en-deçà d'un seuil de hausse des températures. C'est ainsi que le GIEC publie des estimations de budget carbone mondial selon le seuil d'élévation maximale des températures que l'on se donne et le niveau de confiance avec lequel on veut rester en deçà du seuil visé. Ce cadre est cohérent avec la nature de l'externalité climatique qui est liée en premier lieu aux émissions cumulées de gaz à effet de serre dans l'atmosphère :

- l'optimisation sous contrainte du budget carbone conduit à définir une trajectoire optimale de réduction des émissions, associée à une valeur initiale de la valeur carbone – en fonction de la taille du budget, ainsi que du coût des solutions de décarbonation ;
- la croissance dans le temps de la valeur initiale est calée sur le taux d'actualisation. On s'assure par une telle règle (dite « règle de Hotelling¹ ») de minimiser le coût actualisé des efforts pour tenir l'objectif global, ainsi que de la neutralité intertemporelle des efforts : les bénéfices futurs des actions engagées ne sont ni « écrasés » par l'actualisation, ni différés dans le temps.

Le second cas polaire est celui où l'objectif de décarbonation prend la forme d'une trajectoire cible de réduction progressive des flux d'émissions annuels. C'est en pratique le choix des États signataires de l'Accord de Paris : chaque État ne s'attribue pas une quote-part du budget carbone mondial calculé par le GIEC, mais se fixe *ex ante* une trajectoire pluriannuelle de réduction des émissions. En France, cette trajectoire a pour but d'atteindre l'objectif « zéro émission nette » en 2050, en passant par des jalons intermédiaires et des objectifs quinquennaux².

¹ Hotelling H. (1931), « The economics of exhaustible resources », *Journal of Political Economy*, vol. 39(2), avril, p. 137-175.

² Ces objectifs quinquennaux (jusqu'en 2033 pour la SNBC 2 et 2038 pour la future SNBC 3) sont appelés « budget carbone » mais reflètent en réalité des objectifs de réduction annuelle moyenne des émissions plutôt qu'une logique d'optimisation intertemporelle.

La trajectoire française de valeur pour le climat de 2019, dans le contexte de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC 2), s'est inscrite dans cette seconde logique et a livré à ce titre deux grands enseignements :

- le respect d'un objectif ZEN ambitieux oblige à aller chercher des gisements d'abattement à des coûts marginaux élevés. Cette intensité se lit dans les niveaux élevés de la valeur de l'action pour le climat en 2030 (250 €₂₀₁₈ la tonne) et au-delà ;
- la volonté d'enclencher la transition écologique de manière progressive, pour tenir compte de la nécessité de limiter les risques de pertes de pouvoir d'achat, de pertes de compétitivité ou de « coûts échoués », a conduit la SNBC 2 à concentrer le gros des efforts après 2030. Cette propension à décaler les efforts dans le futur se lit dans un niveau initial de la valeur de l'action pour le climat faible (54 €₂₀₁₈ la tonne en 2018) et une forte progressivité dans les années 2020-2030, en écart à la règle de Hotelling.

2. Les motifs de révision aujourd'hui

La trajectoire de la valeur de l'action pour le climat doit bénéficier d'une certaine stabilité dans le temps. La modifier trop souvent, c'est prendre le risque de lui faire perdre sa valeur d'ancrage des anticipations publiques et privées. C'est aussi perturber les évaluations des projets d'investissements qui y ont recours. Il faut donc de « bonnes raisons » pour réviser la trajectoire élaborée il y a six ans¹.

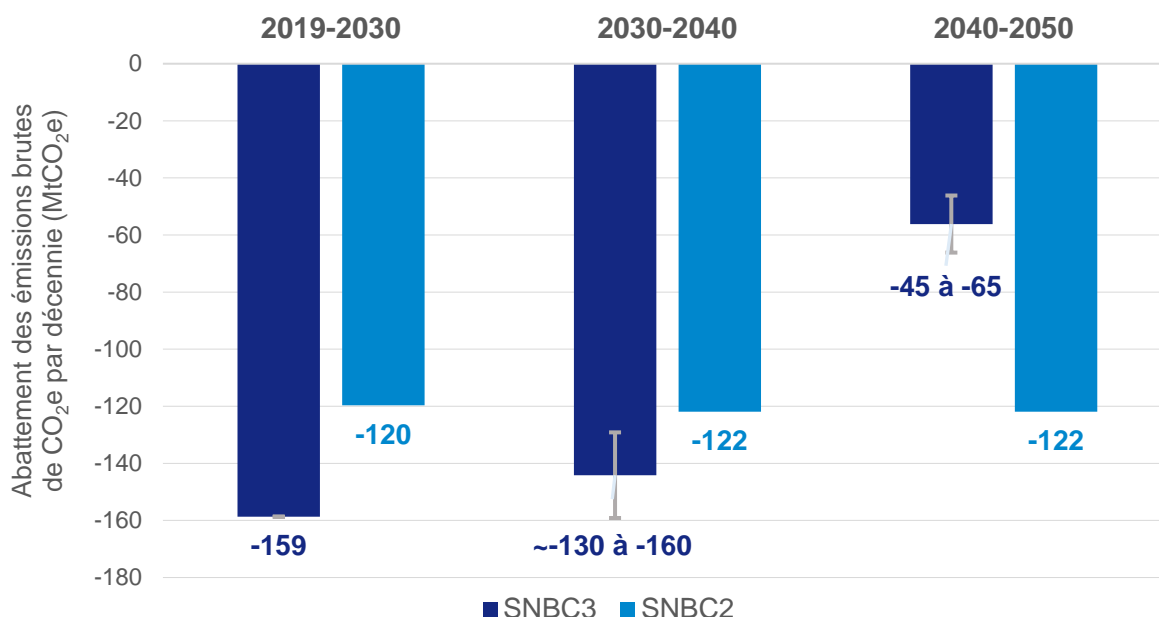
Aujourd'hui, trois séries de facteurs invitent à « réviser » la trajectoire de 2019 : le relèvement de l'ambition 2030, l'évolution du contexte technicoéconomique et la révision du taux d'actualisation socioéconomique.

Le relèvement de l'ambition 2030

Le relèvement de l'objectif 2030 inscrit dans le projet de SNBC 3, de -40 % à -50 % en émissions brutes (par rapport à 1990), contribue à une meilleure répartition des actions dans le temps, avec des efforts avancés à hauteur de 40 millions de tonnes d'ici 2030 (voir Graphique I). Ce relèvement pousse, toutes choses égales par ailleurs, à revoir à la hausse les valeurs de début de période.

¹ France Stratégie (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

Graphique I – Répartition des efforts dans le temps, de la SNBC 2 à la SNBC 3, par décennie entre 2019 et 2050



Note : le projet de SNBC 3 soumis à concertation en novembre 2024 présente une trajectoire jusqu'en 2030. La SNBC 3 finale qui sera publiée en 2025 précisera la trajectoire post-2030 (présentée dans ce document sous forme de fourchettes). La commission a toutefois pu intégrer les travaux les plus récents pour l'élaboration de la valeur de l'action pour le climat.

Lecture : le volume d'émissions brutes de CO₂e à abattre entre 2019 et 2030 est passé de 120 MtCO₂e dans la SNBC 2 à 159 MtCO₂e dans la version provisoire de la SNBC 3, ce qui traduit un renforcement des efforts à fournir à court terme.

Source : DGEC

Une meilleure compréhension des chemins de la décarbonation

Même si l'on ne peut pas parler *a priori* de rupture dans les technologies et les comportements, les chemins de la décarbonation se sont précisés depuis six ans. Au-delà des synthèses réalisées par le GIEC et l'Agence internationale de l'énergie, les travaux sous-jacents à la SNBC 3 montrent que l'on dispose aujourd'hui d'une vision plus claire du portefeuille des technologies bas carbone mobilisables et/ou prévisibles. Les travaux de la commission Criqui sur les coûts d'abattement¹ ont notamment permis de préciser les coûts pour l'économie française des différentes technologies visant à décarboner l'électricité et à électrifier un nombre croissant d'usages. La contribution potentielle des puits a également été approfondie : la dégradation du puits forestier est plus marquée qu'anticipé il y a six ans, tandis qu'à l'inverse il semble possible d'être plus ambitieux concernant la mobilisation des puits technologiques.

¹ Voir la page dédiée à la commission Criqui [sur le site de France Stratégie](#).

Parallèlement, des solutions réalistes de sobriété se dégagent, dont le potentiel d'abattement semble davantage fondé sur des solutions collectives (développement des transports collectifs, densification des villes, etc.) que sur l'anticipation de changements spontanés de comportements individuels.

La révision à la baisse du taux d'actualisation socioéconomique

Le comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics de France Stratégie¹ a revu en 2021 le taux d'actualisation public sans risque, celui-ci baissant de 4,5 % à 3,2 %. Cette révision a pour effet de réduire la pente de la valeur de l'action pour le climat dès lors que la trajectoire se cale sur une règle de Hotelling.

3. Une nouvelle trajectoire fondée sur le meilleur état de l'art

Il n'existe pas d'outil de simulation « clés en main » générant mécaniquement une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat. La commission propose donc une estimation raisonnable fondée sur les principales hypothèses techniques et économiques de la SNBC 3, sur les grands enseignements de l'économie du climat et sur des travaux spécifiques de modélisation.

Des hypothèses économiques et technologiques transparentes, largement fondées sur la Stratégie nationale bas carbone

Du côté de la demande, la SNBC 3 postule qu'un niveau durablement élevé de prix des énergies fossiles inciterait à investir dans l'efficacité énergétique, à utiliser des vecteurs énergétiques bas carbone et à adopter des usages plus sobres. La matérialisation de comportements de sobriété collective serait rendue possible notamment par des investissements et des réglementations dans le domaine des transports, de l'aménagement du territoire ou de l'usage des sols.

Du côté de l'offre, la SNBC 3 considère qu'un portefeuille de technologies structurantes et variées permettrait de parvenir à une décarbonation profonde, moyennant des prix de bascule relativement élevés. À l'horizon 2050, le secteur de l'énergie bas carbone, dont la production d'électricité est déjà largement décarbonée par le mix nucléaire-énergies renouvelables, pourra l'être complètement, moyennant des investissements importants, comme le montre le rapport *Futurs énergétiques 2050* de RTE². Des technologies de décarbonation se diffuseraient dans l'ensemble des secteurs, y compris dans l'industrie lourde, le transport longue distance et l'agriculture. La décarbonation ne serait pas totale

¹ Voir la page dédiée [sur le site de France Stratégie](#).

² RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, rapport complet, février.

et les émissions résiduelles incompressibles seraient compensées par les puits naturels et technologiques.

L'exercice ne postule pas de rupture qui viendrait artificiellement « baisser » la valeur de l'action pour le climat :

- la sobriété permettrait d'alléger le coût de la transition mais ne dispenserait pas de mobiliser des technologies coûteuses dans les secteurs où les émissions sont difficiles à abattre ;
- la commission n'a pas la prescience de l'arrivée d'une nouvelle technologie de rupture (*backstop*) permettant de se passer complètement des énergies fossiles pour un coût modéré ;
- elle postule un potentiel raisonnable d'émissions négatives permises par la taille et l'évolution des puits de carbone (puits naturels compris entre 30 et 40 millions de tonnes, puits technologiques entre 15 et 25 millions de tonnes de CO₂e en 2050) ;
- elle exclut des imports massifs de gaz verts, de biomasse ou de combustibles bas carbone, à la différence de ce qui est envisagé dans certains pays européens.

Un jeu de simulations spécifiques pour définir le champ des possibles

La commission s'est appuyée sur trois grands modèles bien adaptés à l'évaluation de la SNBC : les modèles TiTAN et Vulcain développés par le Commissariat général au développement durable (CGDD), ainsi que le modèle ThreeME, codéveloppé par l'OFCE et l'Ademe et utilisé par la Direction générale du Trésor.

- Le modèle TiTAN, à dominante technologique, permet de définir une trajectoire de long terme représentant le coût de la réduction d'une tonne additionnelle de CO₂e, ce coût marginal d'abattement ayant vocation à croître au fur et à mesure qu'il est nécessaire de mobiliser des technologies plus onéreuses. TiTAN ne comporte pas, en revanche, de bouclage macroéconomique (PIB, emploi, importations, etc.).
- Le modèle ThreeME, à dominante macroéconomique, permet d'explicitier les investissements et les changements de comportement nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone, que l'augmentation d'un signal-prix du carbone induirait, en tenant compte des coûts d'ajustement et des effets de bouclage macroéconomique.
- Le modèle Vulcain est un modèle macroéconomique stylisé permettant d'évaluer les efforts européens et français, en les plaçant dans un cadre international.

La commission a réalisé un large jeu de simulations selon les deux logiques de l'approche coût-efficacité : celle consistant à aligner scrupuleusement les efforts sur les objectifs et les dates programmées de réduction des flux d'émissions de la SNBC 3 ; celle consistant à transformer la totalité des émissions de gaz à effet de serre restant à abattre en un

budget carbone implicite, dont la consommation progressive serait librement optimisée¹ – comme recommandé notamment par Christian Gollier². Cette commission a pu bénéficier du concours du nouveau modèle TiTAN pour réaliser pour la première fois de telles simulations en budget carbone.

Une trajectoire de long terme alignée sur un relèvement de l'ambition 2030

Aucune simulation ne peut prétendre livrer « clés en main » une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat. Chaque modèle est confronté à certaines limites de conception, chaque simulation repose sur un jeu d'hypothèses qui peuvent être « challengées » une à une. Quelle que soit la qualité intrinsèque des modèles, les incertitudes restent fortes lorsque l'horizon s'allonge.

La commission s'est donc livrée à une lecture « raisonnée » des simulations en s'attachant à élaborer une trajectoire conciliant respect des grands jalons 2030 et 2050 de la SNBC 3 et répartition équilibrée des efforts dans le temps :

- la nouvelle trajectoire, présentée dans le Graphique II page suivante, acte une revalorisation initiale de la valeur du carbone, en miroir du relèvement de l'objectif 2030. Celle-ci s'établit à 256 €₂₀₂₃, soit une marche supplémentaire significative par rapport au niveau prévu par la trajectoire de 2019 (187 €₂₀₂₃) ;
- le taux de croissance de la valeur de l'action pour le climat est calé dès le départ sur le taux d'actualisation afin de garantir une neutralité intertemporelle des efforts ;
- le « jalon 2030 », à une valeur « pivot » de 300 €₂₀₂₃, est du même ordre de grandeur que celui de la trajectoire précédente une fois pris en compte les effets de la hausse des prix³. C'est donc bien le relèvement de l'ensemble de la chronique 2025-2030, et non de la seule valeur 2030 qui « sécurise » le respect de l'objectif de -50 % ;
- les valeurs de fin de période sont cohérentes avec les travaux de prospective technologique disponibles sur les plages de coûts des technologies les plus chères. Cette règle est prolongée au-delà de 2050, date d'atteinte du ZEN, jusqu'en 2060 afin de conforter la rentabilité des investissements engagés dans les actifs décarbonés ou dans les puits, mais qui ne seront pas encore totalement amortis en 2050 ;
- le choix de conserver la valeur de l'action pour le climat constante au-delà de 2060 repose sur la nécessité de tenir l'objectif ZEN dans la durée, alors que les énergies fossiles demeureront une option et que les capacités de stockage des puits naturels

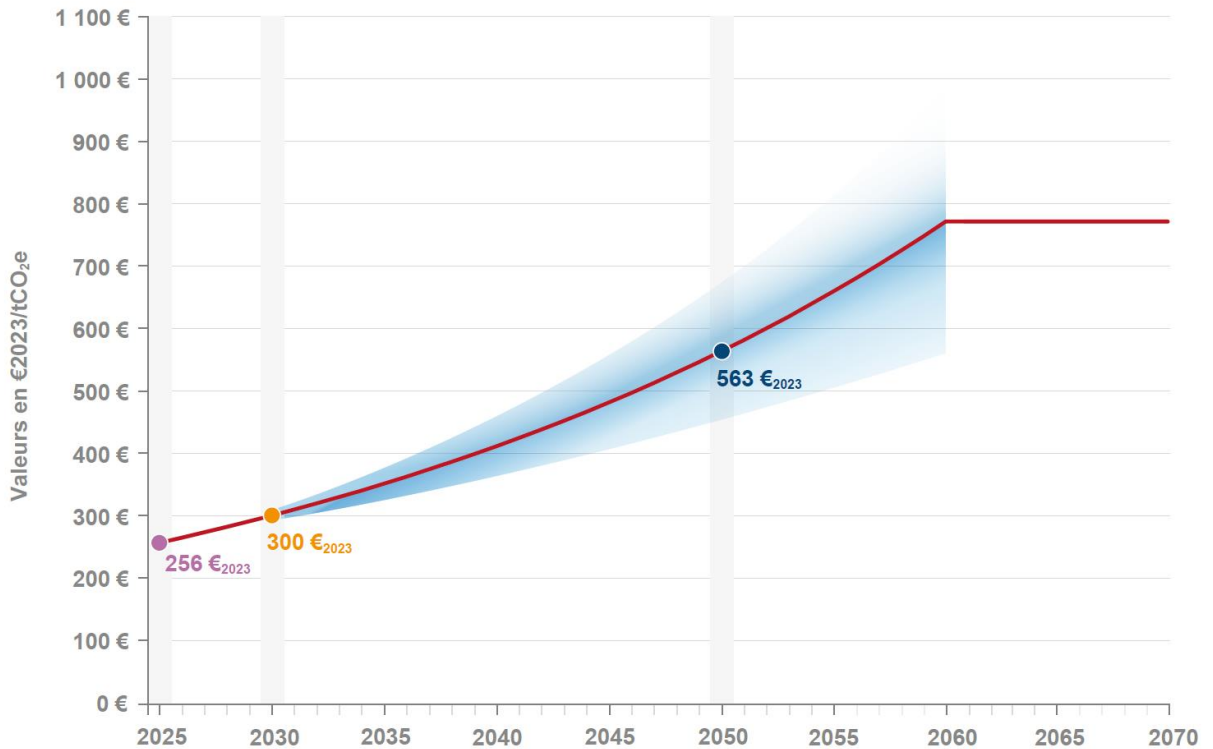
¹ Le secteur des terres et forêts ainsi que l'agriculture sont toutefois paramétrés, faute de bien savoir modéliser leurs coûts d'abattement.

² Gollier C. (2019), *Le Climat après la fin du mois*, Paris, Presses universitaires de France.

³ La valeur pour 2030 est réévaluée sous l'effet principalement de l'inflation (les 250 €₂₀₁₈ deviennent 279 €₂₀₂₃).

resteront limitées. La forme précise de la courbe (plate) du Graphique II repose sur l'hypothèse que les écarts de coûts entre les technologies polluantes et bas carbone sont stables et que les puits technologiques permettent un stockage permanent du CO₂e.

Graphique II – Nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat



Source : commission

Il convient de souligner que les co-bénéfices de l'action climatique (gains sanitaires liés à la rénovation thermique des bâtiments, à la diminution des émissions de particules fines, à une alimentation moins carnée, etc.) ne sont pas pris en compte dans cette trajectoire.

4. Une trajectoire sensible au progrès technique et aux comportements de sobriété

Pour un objectif donné de décarbonation, la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat est entourée de trois types d'incertitudes :

- les incertitudes sur les coûts et le potentiel d'abattement des technologies de décarbonation, elles-mêmes liées aux incertitudes sur le niveau d'effort et de coopération des différentes régions du monde ;

- les incertitudes sur les comportements des acteurs – préférences, élasticités de substitution entre produits « verts » et « bruns », modifications des choix de localisation et de mobilité en réponse aux investissements collectifs dans l'aménagement de l'espace et les transports ;
- les incertitudes sur les hypothèses économiques sous-jacentes, notamment sur la croissance et le prix des énergies fossiles. L'impact de ces incertitudes tend à diminuer lorsque l'horizon s'allonge et que l'économie se décarbone.

Les deux premières incertitudes, en revanche, sont nécessairement croissantes à mesure que l'horizon s'allonge, que les solutions « à portée de main » s'épuisent et que la décarbonation des activités humaines appelle des changements profonds, « non marginaux », de technologies et de comportements.

La délibération collective au sein de la commission, la variété des modèles employés et des simulations réalisées, les éléments de *benchmark* utilisés permettent de prendre la mesure des incertitudes, de les « objectiver », en évitant les biais liés à une opinion personnelle ou à une modélisation particulière.

Ces incertitudes sont prises en compte par des révisions régulières de la trajectoire au cours du temps (sur des intervalles de cinq à dix ans) permettant d'intégrer à la fois les informations nouvelles disponibles et les améliorations méthodologiques : plus le temps passe, plus le niveau de maturité technique et économique des technologies permettant de parvenir à une décarbonation complète des économies à l'horizon fixé se précise. L'impact potentiel de ces incertitudes sur les ajustements futurs de la valeur de l'action pour le climat est illustré qualitativement dans le Graphique II par un cône, croissant dans le temps, encadrant la trajectoire de référence retenue (dans une fourchette de plus ou moins 150 euros à l'horizon 2050).

5. Un guide pour l'action

La valeur de l'action pour le climat donne une mesure synthétique de l'ambition climatique, donc de la valeur à donner aux actions permettant de satisfaire cette ambition.

Le rôle historique de la valeur de l'action pour le climat, qu'il convient de réaffirmer, est d'abord de guider l'action de l'État, des collectivités territoriales, des maîtres d'ouvrage publics, des régulateurs sectoriels en charge des secteurs clés de la décarbonation.

La valeur de l'action pour le climat peut aussi fournir une référence aux entreprises souhaitant se doter d'un prix interne du carbone pour éclairer leurs choix et aux acteurs de la société civile ((équipes de recherche, organisations non gouvernementales, *think tanks*, etc.) pour « challenger » les politiques publiques et formuler des propositions.

Une référence pour évaluer les investissements

L'évaluation des investissements publics est le champ d'action historiquement privilégié de la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat. Elle permet de s'assurer que les impacts des projets sur les émissions de CO₂e sont correctement pris en compte.

Il convient dans ce cadre de veiller à la définition soignée et réaliste de la situation de référence par rapport à laquelle chaque projet d'investissement est évalué. En l'état actuel de l'art, les niveaux de la valeur de l'action pour le climat sont élevés à l'horizon 2050, mais cette valorisation potentiellement favorable est largement émoussée par le choix d'une référence postulant l'atteinte de l'objectif ZEN, alors même que toutes les mesures nécessaires pour l'atteindre ne sont pas encore décidées ou consolidées. La question de la référence se pose avec encore plus d'acuité après 2050, une fois le ZEN atteint, pour « tenir » cet objectif dans la durée, alors qu'un « retour en arrière » vers les énergies fossiles sera toujours possible.

Une référence pour fixer les priorités

Une valeur de l'action pour le climat élevée a pour effet d'élargir le périmètre des actions rentables – ce qui est pertinent et nécessaire pour atteindre les objectifs de la SNBC 3.

Dans ce cadre, la valeur de l'action pour le climat peut être mise en regard des coûts d'abattement des différentes actions de décarbonation possibles (par exemple, le remplacement d'une chaudière au fioul par une pompe à chaleur dans les logements, ou encore le passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique). Si la valeur de l'action pour le climat est de 300 €₂₀₂₃ en 2030, cela veut dire, en simplifiant, que toutes les actions dont le coût socioéconomique est inférieur à 300 €₂₀₂₃ la tonne de CO₂e abattue seraient rentables à cet horizon. À l'inverse, les actions dont le coût serait supérieur à 300 €₂₀₁₈ la tonne en 2030 ne le seraient pas.

Ce travail de comparaison entre valeur de l'action pour le climat et coûts d'abattement revêt une grande importance dans la mesure où les travaux synthétisés par le GIEC ou menés au niveau français par la commission Criqui et par le RTE montrent qu'il existe une forte hétérogénéité des coûts d'abattement, entre secteurs mais surtout au sein de chaque secteur. Une analyse suffisamment fine est donc nécessaire pour sélectionner les actions à plus fort effet de levier et décarboner ainsi l'économie française au meilleur coût.

En pratique, la comparaison entre valeur de l'action pour le climat et coûts d'abattement doit bien sûr être appréciée de manière dynamique et ne pas se résumer à une comparaison mécanique entre valeur de l'action pour le climat et coûts d'abattement du moment :

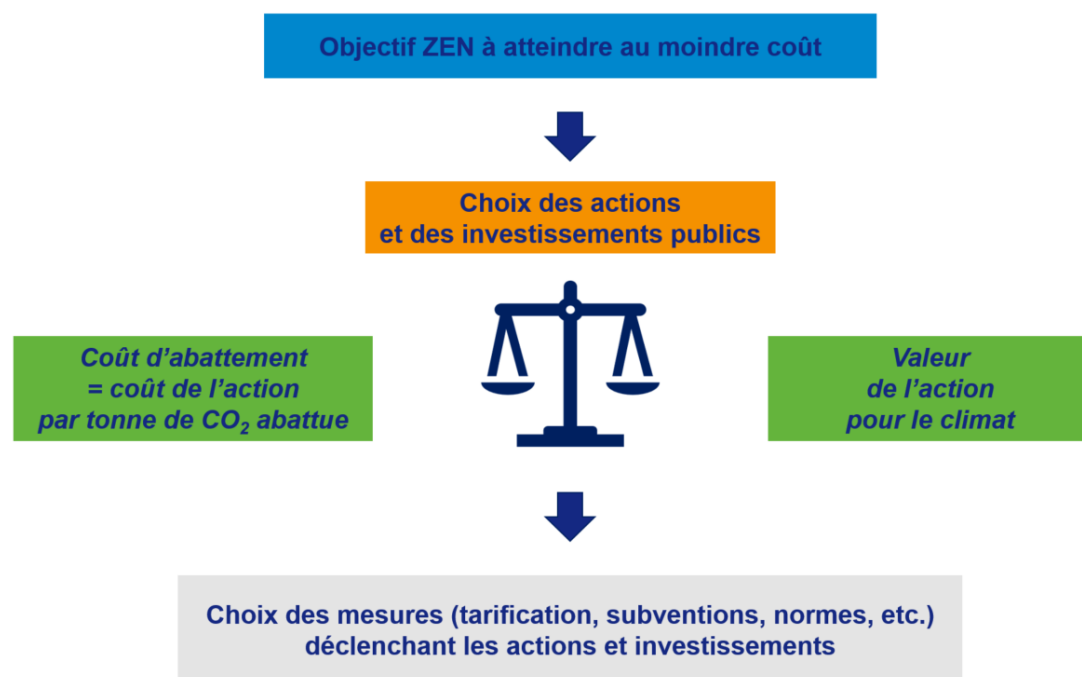
- la comparaison doit prendre en compte les possibles effets d'échelle et d'apprentissage susceptibles de faire ultérieurement baisser un coût initial apparemment « trop » élevé ;

- elle doit aussi prendre en compte les interdépendances entre les différents leviers de décarbonation, notamment lorsque l'électrification des usages pèse sur la tension de production de l'électricité.

Une référence pour calibrer les mesures et accompagner la transition

Les politiques publiques, une fois le périmètre des actions rentables identifié, doivent définir les mesures susceptibles de les déclencher (voir Graphique III). De fait, un coût d'abattement supérieur à zéro signifie, même s'il est inférieur à la valeur de l'action pour le climat, que la solution bas carbone est spontanément plus chère que la solution carbonée et ne se matérialisera pas spontanément, sauf à postuler une évolution favorable des préférences des citoyens ou de la responsabilité sociétale des entreprises.

Graphique III – Usage de la valeur de l'action pour le climat pour évaluer les actions et les mesures prises pour les soutenir



Source : commission

La valeur de l'action pour le climat n'est pas « fléchée » sur une mesure particulière. Les politiques de décarbonation efficaces reposent généralement sur une combinaison prenant en compte les avantages comparatifs de chaque type de mesure :

- la tarification du carbone, application la plus immédiate et la plus efficace du principe pollueur-payeur, permet de soutenir la rentabilité des investissements bas carbone et d'orienter les comportements dans la « bonne direction ». Elle est contrainte par ses

effets anti-redistributifs multi-dimensionnels et par les risques de pertes de compétitivité pour les entreprises, qui peuvent être atténués par l'utilisation des recettes générées ;

- la réglementation permet en théorie d'atteindre un résultat de manière certaine, mais est moins coût-efficace ;
- quant aux subventions, elles peuvent venir soutenir les efforts des ménages et des entreprises vulnérables, mais elles représentent pour les contribuables un coût d'autant plus élevé qu'elles peuvent engendrer des effets d'aubaine.

La commission ne prétend pas trancher la question de la bonne combinaison des mesures. Elle formule deux recommandations de principe.

- La première est que l'on puisse évaluer, à l'aune de la valeur de l'action pour le climat, usage par usage, si la combinaison de mesures retenue est bien dimensionnée : le cumul des mesures doit être suffisant pour permettre de basculer vers un usage bas carbone. Il faut, à l'inverse, vérifier que les prix implicites des normes (le coût par tonne de CO₂e abattue), plus difficiles à « lire » que les signaux-prix explicites (taxes, prix des quotas échangés sur le marché européen), ne sont pas trop élevés et ne pèsent pas de manière indue sur le pouvoir d'achat et les coûts de production. Il faut de même vérifier que les subventions correspondent bien à une utilisation efficace de l'argent public.
- La seconde est que l'on puisse évaluer les effets redistributifs de chaque mesure. Là encore il existe une certaine dissymétrie dans les évaluations. Les effets redistributifs de la tarification du carbone sont aujourd'hui mieux documentés ; ceux qui s'attachent aux normes et aux subventions restent moins bien connus, même si leur évaluation progresse pour certaines mesures (dans le champ notamment des aides à la rénovation thermique et aux énergies renouvelables).

La méthode ABCDE¹ développée par la Direction générale du Trésor offre ainsi une bonne illustration de grille d'analyse multicritères pour prendre en compte ces différents effets.

Sur le fond, une valeur de l'action pour le climat élevée signale la nécessité d'engager, dès à présent, des efforts importants et d'accompagner ces efforts d'une politique de compétitivité industrielle et de justice sociale.

¹ Le référentiel ABCDE proposé par la Direction générale du Trésor propose une grille d'évaluation de la mise en œuvre d'une politique publique sous l'angle de cinq critères : les coûts d'abattement, les effets de bouclage, la cohérence avec la stratégie de décarbonation, la capacité à déclencher les actions attendues, et les effets indirects. Voir DG Trésor (2023), *Rapport intermédiaire. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, décembre.



INTRODUCTION

L'ambition française est de réduire de moitié les émissions brutes de CO₂ d'ici 2030 (par rapport à 1990), puis d'éliminer complètement les émissions nettes à l'horizon 2050. C'est l'objectif « ZEN » : « zéro émission nette » de gaz à effet de serre liée aux activités humaines, les émissions *brutes* résiduelles ayant vocation à compter de 2050 à être absorbées par les puits de carbone naturels et technologiques.

La poursuite de cet objectif, les efforts qu'il requiert et les bénéfices environnementaux qu'il procure s'il est partagé par un nombre suffisant de grands pays sur la planète, ne sont pas spontanément pris en compte dans les calculs financiers des acteurs publics et privés. L'Europe et la France peuvent se targuer de premiers résultats positifs, avec une baisse des émissions de gaz à effet de serre de plus de 30 % depuis 1990 – alors que les émissions augmentent ailleurs dans le monde. Mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour se mettre sur une trajectoire « ZEN ».

La valeur de l'action pour le climat (VAC) – historiquement appelée « valeur tutélaire du carbone » – donne une mesure du chemin qui reste à parcourir et de l'intensité des efforts à accomplir. Elle exprime corrélativement la valeur que la société doit accorder aux actions publiques et privées de décarbonation permettant d'arriver au bout du chemin. Ce sont les deux faces d'une même pièce.

Donner une valeur monétaire à l'action pour le climat, c'est ainsi reconnaître la valeur de l'action par rapport à la non-action, c'est se donner une vision partagée des efforts à engager. Il ne s'agit pas de favoriser une « marchandisation » de la nature ou de l'environnement. Il s'agit bien au contraire de donner une valeur aux actions de lutte contre le changement climatique spontanément négligée par le marché, tant du côté des producteurs que des consommateurs.

Dans le sillage des précédentes commissions de France Stratégie présidées par Marcel Boiteux (2001)¹ et Alain Quinet (2008 et 2019)², le présent rapport met à jour la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat. Il est le fruit d'un travail collégial réunissant plus d'une vingtaine d'experts et d'économistes de l'environnement issus de l'université, du monde économique et social, des grandes administrations concernées et des *think tanks*³. Cette commission a procédé par ailleurs à plusieurs consultations et auditions⁴.

¹ Commissariat général du Plan (2001), *Transports. Choix des investissements et coûts des nuisances*, rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, juin.

² Centre d'analyse stratégique (2008), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française ; France Stratégie (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

³ La liste des membres de la commission figure en [Annexe 2](#).

⁴ La liste des personnes consultées ou auditionnées figure en [Annexe 3](#).



CHAPITRE 1

LES OBJECTIFS CLIMATIQUES ET LES ENJEUX DE LA TRANSITION VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

1. Bilan et perspectives de l'action pour le climat : l'étau se resserre

Depuis les travaux des précédentes commissions sur la valeur de l'action pour le climat (VAC) de 2008 et en 2019¹, le contexte mondial de la lutte contre le changement climatique s'est profondément transformé :

- d'un côté, des objectifs plus ambitieux ont été définis, et les technologies pour y parvenir ont gagné en maturité ;
- de l'autre, les émissions de gaz à effet de serre (GES) n'ont cessé d'augmenter au niveau mondial, même si une baisse a été engagée en Europe. Les effets du réchauffement climatique se ressentent dès aujourd'hui dans toutes les régions du monde.

Ce chapitre, sans prétendre restituer l'ensemble des enjeux scientifiques, économiques et sociaux du changement climatique, s'attache à rappeler ce qu'une démarche nationale d'évaluation de l'impact carbone des actions et projets doit nécessairement prendre en compte.

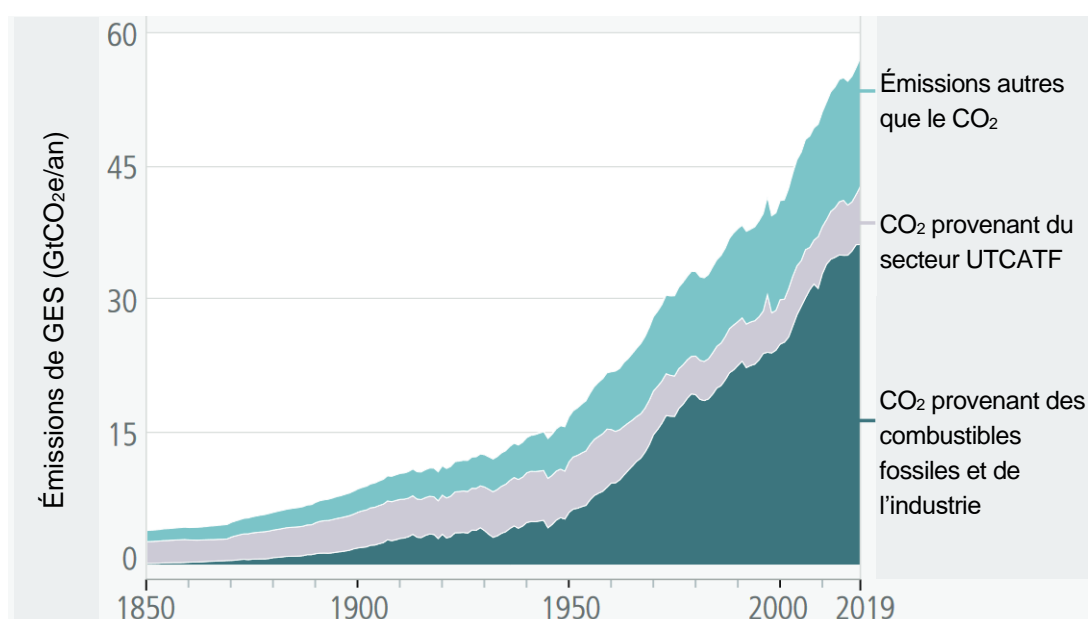
¹ Centre d'analyse stratégique (2008), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport de la mission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française ; France Stratégie (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

1.1. Au niveau mondial, une dérive continue des émissions de gaz à effet de serre, malgré une baisse d'un tiers depuis 1990 en Europe

Des émissions toujours plus importantes au niveau mondial

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (voir Encadré 1) ont entamé une croissance forte à partir des années 1950 (voir Graphique 1). Tous GES confondus et en incluant les secteurs des terres (usage des sols et foresterie), elles ont atteint 59 GtCO₂e en 2019¹, en hausse de 54 % par rapport à 1990.

Graphique 1 – Émissions anthropiques mondiales de GES entre 1850 et 2019 (en GtCO₂e)



UTCATF = Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

Source : GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, mars, p. 9

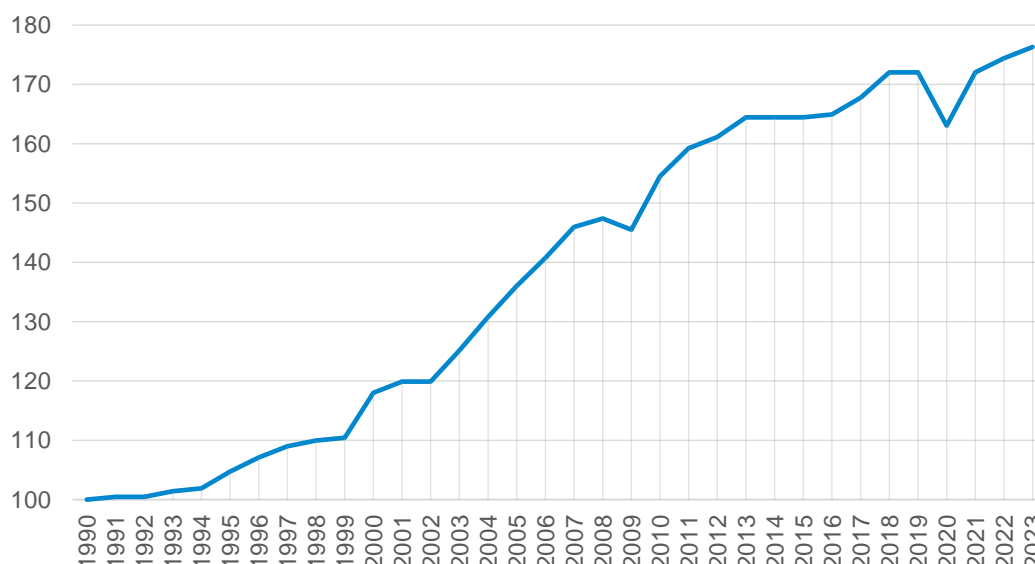
Sur les deux dernières décennies, les émissions mondiales de GES n'ont cessé d'augmenter, sauf brièvement pendant les grands chocs qu'ont été la crise financière de 2007-2008² et la pandémie de Covid-19 entre 2020 et 2021 (voir Graphique 2). Les émissions ont atteint un nouveau record en 2022 (55 GtCO₂e, dont 36,8 Gt de CO₂). Cette

¹ GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, mars, p. 8.

² Entre 2008 et 2009, le PIB mondial calculé en dollars constants s'est réduit de 1,73 % et les émissions mondiales de GES ont baissé de 0,9 % (sources : World Development Indicators et Global Carbon Project).

tendance s'est poursuivie en 2023 pour les émissions de CO₂ d'après les premières estimations, avec 37 GtCO₂ (+1 % par rapport à 2022)¹.

Graphique 2 – Croissance annuelle des émissions mondiales de CO₂ (base 100 en 1990)



Note : émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergies fossiles.

Sources : calculs des auteurs à partir de AIE (2024), [CO₂ Emissions in 2023. A new record high, but is there light at the end of the tunnel?](#), Agence internationale de l'énergie, rapport, mars

Encadré 1 – Les gaz à effet de serre

Les engagements de l'Accord de Paris portent sur sept GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆, NF₃). Les trois quarts des émissions de GES sont des émissions de CO₂.

Ces gaz se distinguent par leur durée de vie et leur pouvoir de réchauffement. Le pouvoir de réchauffement global (PRG) traduit l'impact d'un gaz donné sur le réchauffement climatique relativement au CO₂, à un horizon temporel donné (de 100 ans). Cela permet de convertir les masses des différents gaz en une unité unique, la tonne d'équivalent CO₂ (tCO₂e), qui représente la masse de CO₂ qu'il faudrait pour générer le même impact sur le réchauffement climatique qu'une tonne du gaz considéré.

Ainsi, à horizon de 100 ans, une tonne de méthane a un pouvoir réchauffant global de 28, ce qui signifie qu'une tonne de méthane émise aujourd'hui contribue autant

¹ Agence internationale de l'énergie ; Global Carbon Project (2023), [Fossil CO₂ emissions at record high in 2023](#), rapport, décembre.

au réchauffement climatique mesuré dans 100 ans que 28 tonnes de dioxyde de carbone émises aujourd'hui. Une tonne de méthane correspond donc à 28 tCO₂e. Cette équivalence présente néanmoins des limites, notamment parce qu'elle est sensible à la durée de référence choisie.

Tableau 1 – Les gaz à effet de serre : durée de vie, pouvoir de réchauffement, répartition et source d'émissions

		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Gaz fluorés			
					HFC	PFC	SF ₆	NF ₃
Concentration atmosphérique	2022*	417 ppm	1 912 ppb	336 ppm	225 ppt	92,8 ppt	11 ppt	2,5 ppt
	2014	397 ppm	1 823 ppb	327 ppb	> 157 ppt	> 6,5 ppt	8,2 ppt	< 1 ppt
	2005	379 ppm	1 774 ppb	319 ppb	> 49 ppt	> 4,1 ppt	5,7 ppt	-
Durée de vie approximative dans l'atmosphère		**	11,8	109	de quelques semaines à plusieurs milliers d'années			
Pouvoir de réchauffement global, cumulé sur 100 ans		1	28	273	[<1 ; 12 400] selon les gaz	[<1 ; 11 000] selon les gaz	23 500	16 100
Part des émissions mondiales de GES par substance dans les émissions totales 2021		75 %	18 %	4 %	2%			
Source des émissions anthropiques		Combustion de ressources fossiles, procédés industriels, déforestation	Déchets, agriculture et élevage, procédés industriels	Agriculture, procédés industriels, engrais	Sprays, réfrigération, procédés industriels			Fabrication de composants électroniques

ppm : partie par million ; ppb : partie par milliard ; ppt : partie par trillion.

* En 2021 pour les gaz HFC, PFC, SF₆, NF₃.

** La durée de vie du dioxyde de carbone ne peut pas être représentée par une seule valeur car ce gaz n'est pas détruit au fil du temps : il migre entre les océans, l'atmosphère et le système terrestre. Une part de l'excès de CO₂ est absorbée rapidement (par la surface des océans, par exemple), mais une autre restera dans l'atmosphère pendant plusieurs milliers d'années du fait de la lenteur du processus transférant le carbone aux sédiments océaniques.

Note : un million de tonnes de carbone (1 MtC) = 3,667 millions de tonnes de CO₂.

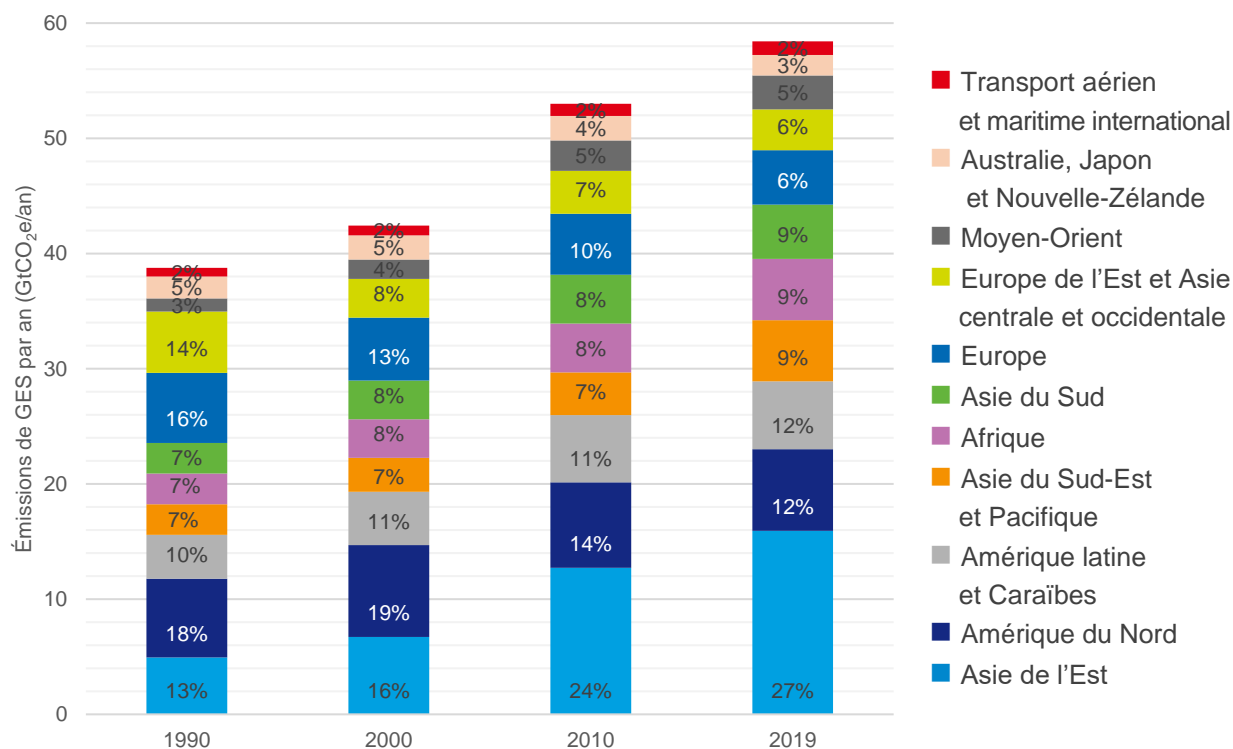
Sources : rapport Quinet (2019) ; CGDD (2023), [Chiffres clés du climat. France, Europe, Monde – Édition 2023](#), Commissariat général au développement durable, octobre ; United States Environmental Protection Agency (2025), « [Climate Change Indicators: Greenhouse Gases](#) », février

Des efforts européens déjà significatifs

Les régions du monde ont contribué différemment dans le temps à l'augmentation des émissions depuis l'ère préindustrielle. Si l'Amérique du Nord et l'Europe sont historiquement les plus importantes contributrices, leurs émissions territoriales ont diminué

depuis 1990 – de respectivement 2 % aux États-Unis et 31 % dans l’UE 27¹ entre 1990 et 2022. Les émissions des pays émergents, notamment des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud) ont fortement accrues durant la même période (voir Graphique 3). En 2022, le continent asiatique représentait près de la moitié des émissions mondiales.

Graphique 3 – Répartition des émissions de GES par région du monde entre 1990 et 2019



Source : commission, d’après GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, mars, p. 11

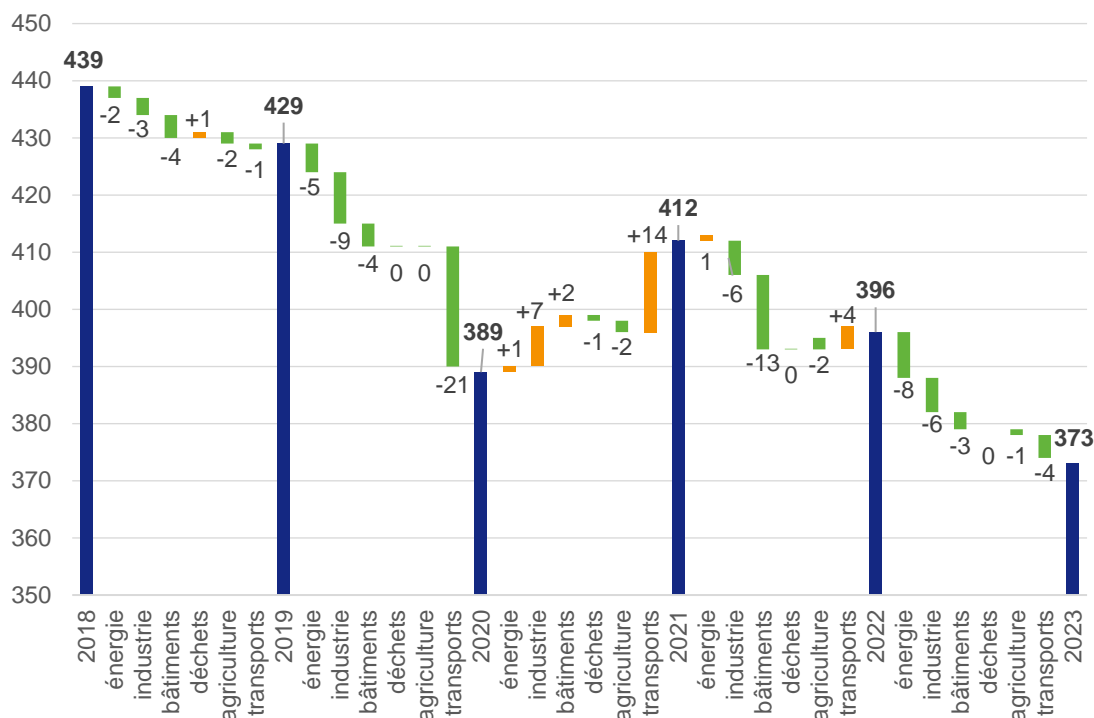
Des émissions françaises en baisse, mais une dégradation des puits for

Comme l’ensemble de l’Europe, la France est engagée sur une trajectoire de baisse de ses émissions territoriales brutes : celles-ci sont estimées à 373 MtCO₂e en 2023 (hors UTCATF), inférieures de 31 % à celles de 1990.

¹ CGDD (2023), *Chiffres clés du climat. France, Europe, Monde – Édition 2023*, octobre, p. 37 et 45.

D'après les dernières estimations du Citepa, le deuxième budget carbone pour les émissions brutes de la SNBC 2 devrait être respecté¹. L'ensemble des grands secteurs émetteurs ont contribué à cette réduction (voir Graphique 4), à l'exception du secteur des transports.

Graphique 4 – Évolution des émissions de GES entre 2018 et 2023 en France (en MtCO_{2e})



Note : pré-estimation pour l'année 2023.

Lecture : les barres en vert correspondent à des réductions d'émissions, les barres en orange indiquent une hausse des émissions dans le secteur correspondant.

Source : commission, d'après Citepa (2024), [Rapport Secten 2024](#), p. 4

Cette réduction des émissions brutes ne se retrouve pas intégralement dans les émissions nettes. Le budget carbone 2019-2023 pour les émissions nettes, incluant le secteur UTCATF², devrait être dépassé de 15 MtCO_{2e} compte tenu de la dégradation des puits naturels de carbone³. Ceux-ci se sont en effet réduits de plus de moitié, depuis le début des

¹ HCC (2024), [Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population](#), rapport annuel, Haut Conseil pour le climat, juin.

² Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

³ Les « puits naturels » désignent l'ensemble des émissions nettes du secteur UTCATF, c'est-à-dire la somme des puits forestiers, des produits bois (stockage dans les panneaux, les meubles, etc.), des sols (conversion de prairies et de terres cultivées), et des zones humides et autres postes mineurs. À ces éléments s'ajoute

années 2000, en passant de -54 MtCO₂e en 2004 à -36 MtCO₂e en 2015 et à -21 MtCO₂e en 2023¹.

Cette dégradation s'explique principalement par la mortalité exceptionnelle des écosystèmes forestiers, en dépit de la hausse de la surface des forêts. La combinaison du stress thermique (intensification des vagues de chaleur), du stress hydrique (sécheresses des sols superficiels), des maladies (comme le champignon responsable de la chalarose du frêne), des ravageurs (par exemple, les scolytes entre 2018 et 2022 dans le Nord-Est) et des incendies a conduit, au cours de la dernière décennie, à une mortalité exceptionnelle des arbres en France métropolitaine². Celle-ci a augmenté de 80 % ces dernières années, passant de 7,4 Mm³/an en moyenne entre 2005 et 2013 à 15,2 Mm³/an entre 2014 et 2022³. Selon les études prospectives les plus récentes, cette tendance devrait spontanément se poursuivre d'ici à 2050 en raison du changement climatique⁴.

1.2. Les effets déjà visibles du réchauffement climatique

Des dommages perceptibles sur l'ensemble de la planète

La responsabilité sans équivoque des activités humaines dans le réchauffement global a été réaffirmée dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC⁵. Sur les dix dernières années (2014-2023), la température moyenne dans le monde était 1,2 °C plus élevée que la période 1850-1900⁶. L'année 2023 a été la plus chaude jamais enregistrée (+1,43 °C [1,3-1,5] par rapport aux niveaux préindustriels de 1850-1900), en partie à cause du phénomène El Niño.

Les rapports successifs du GIEC ont documenté de manière de plus en plus précise les effets visibles et mesurables du changement climatique sur l'atmosphère, les océans, la

en 2050 la comptabilisation du stockage imputé aux sols forestiers et au bois mort dénommé « INV+ » (non comptabilisés à ce jour dans l'inventaire Secten publié par le Citepa, mais estimé à environ -12 MtCO₂e).

¹ Gouvernement (2024), *Projet de Stratégie nationale bas-carbone n° 3. Premières grandes orientations à l'horizon 2030 et enjeux à l'horizon 2050*, novembre.

² IGN (2023), *Inventaire forestier national*, Institut national de l'information géographique et forestière, octobre.

³ IGN (2024), *Inventaire forestier national*, Institut national de l'information géographique et forestière, octobre.

⁴ HCC (2024), *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*, op. cit.

⁵ « A.1 Human activities, principally through emissions of greenhouse gases, have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1,1 °C above 1850-1900 in 2011-2020. Global greenhouse gas emissions have continued to increase, with unequal historical and ongoing contributions arising from unsustainable energy use, land use and land-use change, lifestyles and patterns of consumption and production across regions, between and within countries, and among individuals. » GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers – Headline Statements*, mars.

⁶ HCC (2024), *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*, op. cit.

cryosphère¹ et la biosphère dans l'ensemble des régions du monde, entraînant des dommages sur l'environnement et les populations dont certains sont déjà visibles :

- élévation du niveau de la mer de 0,2 mètre entre 1901 et 2018 ;
- hausse de la fréquence et/ou de l'intensité d'évènements naturels extrêmes : vagues de chaleur, précipitations, sécheresses, cyclones ;
- effets sur les personnes, tels que l'insécurité alimentaire, la restriction de l'accès à l'eau ou des risques de mortalité ou de morbidité ;
- dommages graves et irréversibles aux écosystèmes, notamment l'extinction massive des espèces ;
- impacts économiques sur les secteurs exposés au changement climatique (agriculture, pêche, tourisme, énergie, etc.).

Le dernier rapport du GIEC a également passé en revue les enjeux relatifs à l'adaptation au changement climatique, aujourd'hui considéré comme complément indispensable à la politique de lutte contre le changement climatique.

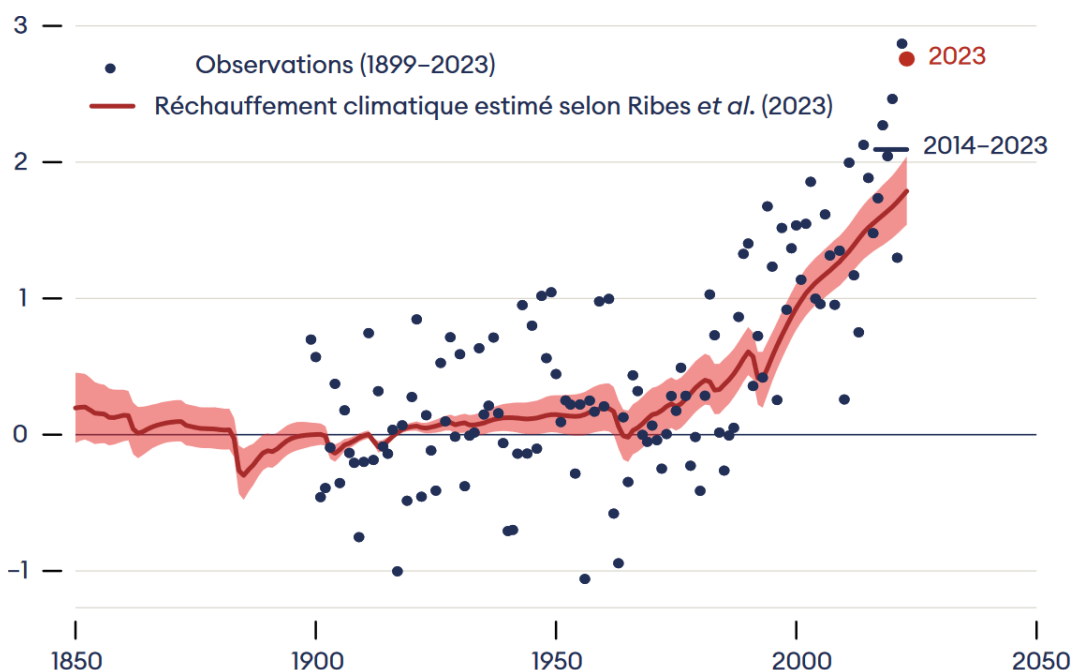
Des dommages visibles aussi en Europe et en France

L'Europe n'est pas épargnée par les conséquences du changement climatique : le territoire de l'Union européenne se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne mondiale. En France, le changement climatique (voir Graphique 5) s'est manifesté ces dernières années par un certain nombre d'évènements extrêmes : sécheresse prolongée (2022-2023) ; épisodes de tempêtes (à l'image d'Alex en 2020 ou Ciaran en 2023) ; inondations par débordement de cours d'eau ou submersion marine (Pas-de-Calais fin 2023 et début 2024) ; incendies de forêt (Gironde, 2022) ; multiples épisodes de grêle et orages intenses (printemps 2022 et 2023) ; vagues de chaleur plus longues et intenses (août 2023) ; accélération de la fonte des glaciers alpins et pyrénéens, recul de la durée et du volume d'enneigement², etc., ainsi que la dégradation des puits de carbone forestier (voir *supra*).

¹ Ensemble des masses de glace, de neige et de sols gelés présentes sur la Terre.

² HCC (2024), *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*, op. cit.

Graphique 5 – Augmentation des températures annuelles moyennes en France métropolitaine entre 1850 et 2023



Lecture : les points bleus correspondent aux anomalies (positives ou négatives) de températures moyennes observées en France entre 1899 et 2022. La courbe rouge retrace l'évolution du réchauffement dû aux activités humaines et influences externes connues (par exemple les volcans) sur la période 1850-2022 estimée par Ribes *et al.* (2022), en combinant modèles et observations par rapport à la moyenne des températures observées sur la période 1900-1930.

Source : HCC (2024), [Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population, rapport annuel, Haut Conseil pour le climat](#), figure 1.1a, p. 32 ; d'après Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubuisson B., Douville H. et Terray L. (2022), « [An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint](#) », *Earth System Dynamics*, vol. 13(4), p. 1397-1415

1.3. Un budget carbone mondial en épuisement rapide

Le sixième rapport du GIEC montre que le niveau de réductions d'émissions atteint lors de la décennie en cours va largement déterminer notre capacité à limiter le réchauffement global de la Terre à 1,5 °C ou 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, qui nécessite d'atteindre « zéro émission nette » de gaz à effet de serre d'ici la seconde moitié du XXI^e siècle :

- la température du globe augmente en moyenne de 0,45 °C (avec une fourchette d'incertitude comprise entre 0,27 et 0,63 °C) tous les 1 000 GtCO₂ émis ; le niveau de réchauffement atteindrait en 2100 entre 2,2 et 3,5 °C en tenant compte des mesures adoptées par les États en 2020 ;
- la hausse cumulée des émissions entraînera avec une probabilité de 50 % (40 % à 60 % selon les scénarios) un réchauffement supérieur à 1,5 °C à court terme, d'ici 2030-2035, même dans un scénario de forte réduction des émissions (SSP1-1.9) – dès la fin des années 2020 dans le scénario à fortes émissions de GES (SSP5-8.5) ;

- le budget restant en 2019 s'élevait à 500 GtCO₂ pour limiter la hausse à 1,5 °C, avec une probabilité de 50 %, et à 1 150 GtCO₂ pour une cible de 2 °C, avec une probabilité de 67 %.

Tableau 2 – Budget carbone restant en 2020 selon le niveau de réchauffement (GtCO₂)

Niveau de réchauffement entre 1850-2019 et 2010-2019 (°C)		Émissions historiques de CO ₂ cumulées entre 1850 et 2019 (GtCO ₂)				
+1,07 [0,8-1,3]		2 390 (± 240)				
Niveau de réchauffement mondial approximatif par rapport à la période 1850-1900 (°C)	Niveau de réchauffement mondial relativement à la période 2010-2019 (°C)	Budgets carbone restants estimés à partir du 1 ^{er} janvier 2020 avant d'atteindre un niveau de réchauffement mondial donné (GtCO ₂)				
		Probabilité de limiter le réchauffement au niveau de température indiqué*				
		17 %	23 %	50 %	67 %	83 %
+1,5	+0,43	900	650	500	400	300
+1,7	+0,63	1 450	1 050	850	700	550
+2	+0,93	2 300	1 700	1 350	1 150	900

* La probabilité de limiter le réchauffement à un niveau de température donné dépend notamment de la réponse climatique transitoire aux émissions cumulées de CO₂ (TCRE), c'est-à-dire le rapport entre la variation moyenne de température de surface mondiale pour chaque unité de CO₂ émise. Plusieurs facteurs d'incertitude, relatifs aux émissions de GES hors CO₂ ou aux estimations des émissions passées, peuvent influencer à la hausse ou à la baisse ces budgets carbone.

Lecture : les températures se sont élevées de +0,8 à +1,3 °C entre 1850-1900 et 2010-2019 (meilleure estimation à +1,07 °C), pour un montant cumulé d'émissions de CO₂ de 2 390 GtCO₂. Le montant du budget carbone restant dépend du niveau de réchauffement atteint et de la TCRE. Pour limiter le réchauffement à 2 degrés avec une probabilité de 50 %, le budget carbone restant s'élève à 1 350 GtCO₂.

Source : commission, d'après GIEC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe I, août, Summary for policymakers, table SPM.2, p. 29 et Technical Summary, table TS.3, p. 98

Le budget carbone se définit comme la quantité maximale de carbone qui peut être émise pour rester en-deçà d'une hausse donnée des températures (1,5 °C ou 2 °C) avec une probabilité donnée. Cette approche en budget carbone est cohérente avec le caractère « d'externalité de stock » du changement climatique, qui est lié à l'accumulation de gaz à effet de serre au fil du temps et non au flux instantané d'émissions. Comme le montre le Tableau 2 ci-dessus, les budgets carbone mondiaux sont aujourd'hui en voie d'épuisement. L'enjeu des politiques climatiques est désormais d'assurer le respect de ce budget, d'en optimiser la consommation et de préparer la transition vers une économie où les émissions brutes résiduelles de GES sont équilibrées par les puits de carbone.

Encadré 2 – Les derniers scénarios du GIEC pour atteindre la neutralité carbone

Le cinquième rapport du GIEC s'appuyait sur quatre scénarios définissant des trajectoires d'émissions et un niveau de forçage radiatif¹ à l'horizon 2100, les *Representative Concentration Pathways* (RCPs) : RCP 2.6 (faibles émissions), RCP 4.5, RCP 6.0 (scénarios intermédiaires) et RCP 8.5 (émissions fortes)². Ce dernier peut être considéré comme une borne haute des fenêtres d'incertitude, susceptible de se réaliser par exemple en cas de boucles de rétroaction du carbone plus fortes que prévu³, mais pas comme un scénario *Business as usual*⁴.

Le GIEC a depuis défini cinq trajectoires socioéconomiques partagées – les *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs)⁵ qui proposent des trajectoires économiques (PIB nationaux, évolution du commerce international) et démographiques (population territorialisée, niveau d'urbanisation, etc.) agrégées au niveau mondial, indépendamment du changement climatique.

Le sixième rapport du GIEC s'articule autour de neuf scénarios SSPx-y combinant les trajectoires socioéconomiques (x) à celles de niveaux de forçage radiatif futurs (y)⁶. Le niveau de réchauffement global, plus que le scénario d'émissions de gaz à effet de serre et l'horizon temporel retenus, conditionne les impacts attendus du changement climatique, la vitesse à laquelle sont atteints les différents niveaux de concentration ne changeant pas la forme ni l'ampleur des impacts physiques qui y

¹ Le GIEC définit le « forçage radiatif » comme la variation du flux radiatif net au sommet de l'atmosphère (exprimé en W/m²) due à la modification de facteurs externes tels que la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique, la concentration en aérosols d'origine volcanique ou le rayonnement solaire. Voir GIEC (2021), *Climate Change 2021...*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe I, août, « Glossaire ».

² GIEC (2014), *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*, cinquième rapport du GIEC, contribution du groupe I. Le nombre suivant le sigle RCP correspond au forçage radiatif à l'horizon 2100 de la trajectoire désignée (en W/m²).

³ Voir Hausfather Z. (2019), « [Explainer: The high-emissions "RCP8.5" global warming scenario](#) », *CarbonBrief.org*, article du 21 août ; GIEC (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.*, Chapitre 1 ; et GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe III, avril, Chapitre 3.

⁴ Section en partie tirée de Delahais A. et Robinet A. (2023), « [Coûts de l'inaction face au changement climatique en France : que sait-on ?](#) », Document de travail, n° 2023-01, France Stratégie, mars.

⁵ Voir O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L. *et al.* (2017), « [The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century](#) », *Global Environmental Change*, n° 42, janvier, p. 169-180.

⁶ Voir GIEC (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.*, Chapitre 1, ou Vailles C. (2021), « [D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du GIEC ?](#) », I4CE, Billet d'analyse, septembre.

sont associés¹. Cette approche est d'autant plus pertinente que pour chaque trajectoire d'émissions futures, le champ d'incertitude sur la température moyenne globale atteinte est plus ou moins large (voir Tableau 3).

Tableau 3 – Niveaux de réchauffement moyen par rapport à la période 1850-1900 correspondant aux combinaisons entre trajectoires socioéconomiques et trajectoires d'émissions, à différents horizons temporels

Scénario	Court terme 2021-2040		Moyen terme 2041-2060		Long terme 2081-2100	
	Meilleure estimation (en °C)	Intervalle « hautement probable » (en °C)	Meilleure estimation (en °C)	Intervalle « hautement probable » (en °C)	Meilleure estimation (en °C)	Intervalle « hautement probable » (en °C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 à 1,7	1,6	1,2 à 2	1,4	1,0 à 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 à 1,8	1,7	1,3 à 2,2	1,8	1,3 à 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 à 1,8	2	1,6 à 2,5	2,7	2,1 à 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 à 1,8	2,1	1,7 à 2,6	3,6	2,8 à 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 à 1,9	2,4	1,9 à 3	4,4	3,3 à 5,7

Lecture : à moyen terme (2041-2060), dans un scénario correspondant à la trajectoire SSP2-4.5, le réchauffement moyen à l'échelle mondiale devrait atteindre + 2 °C, par rapport à la période 1850-1900.

Source : GIEC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe I, août, Summary for policymakers, p. 14

Enfin, les *Illustrative Mitigation Pathways* (IMPs) sont des scénarios sélectionnés pour illustrer l'atteinte de réductions d'émissions par différentes combinaisons de stratégies d'atténuation, en mettant l'accent sur l'une ou l'autre (déploiement des renouvelables, maîtrise de la demande, capture et stockage de carbone, etc.). Ils sont rassemblés en huit catégories (de C1 à C8), en fonction de la probabilité d'atteindre ou de dépasser certains niveaux de réchauffement. Les différentes catégories peuvent être rapprochées des autres familles de scénarios évoquées plus haut (voir Tableau 4).

¹ GIEC (2021), *Climate Change 2021...*, op. cit. Seuls certains impacts aux dynamiques temporelles plus lentes sortent de ce cadre (montée du niveau des mers, par exemple).

Tableau 4 – Catégories de scénarios du GIEC

Catégorie	Niveau de réchauffement atteint en 2100	SSPx-y	RCPy	Illustrative Mitigation Pathways (IMP)
C1	1,5 °C (> 50 %) sans dépassement ou avec dépassement limité (+0,1 °C)	Très bas (SSP1-1.9)		IMP-Low Demand (LD) : faible demande de ressources (sobriété, efficacité) et haut niveau de services IMP-Renewables (Ren) : remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables IMP-Shifting Pathways (SP) : baisse de la demande d'énergie ; prise en compte des objectifs de développement durable (réduction des inégalités) ; fin des énergies fossiles
C2	Retour à 1,5 °C (> 50 %) après dépassement important (+0,1-0,3 °C)			IMP-Neg : hausse de la demande globale d'énergie ; fort déploiement des méthodes de capture de carbone ; résidu d'énergies fossiles en 2100
C3	2 °C (> 67 %)	Bas (SSP1-2.6)	RCP 2.6	IMP-Gradual Strengthening (GS) : renforcement graduel des politiques actuelles ; hausse de la demande globale d'énergie ; forte mobilisation des technologies de capture et stockage de carbone
C4	2 °C (> 50 %)			
C5	2,5 °C (> 50 %)			
C6	3 °C (> 50 %)	Intermédiaire (SSP2-4.5)	RCP 4.5	ModAct : application des contributions nationales (NDCs) formulée en 2020 (scénario de référence)
C7	4 °C (> 50 %)	Haut (SSP3-7.0)		Current Policies (scénario de référence)
C8	Dépassement des 4 °C (> 50 %)	Très haut (SSP5-8.5)	RCP 8.5	

Lecture : une partie des trajectoires implique un dépassement temporaire (limité ou important) de l'objectif de +1,5 °C précédent l'atteinte de la neutralité carbone et la stabilisation des températures. Plus la durée et le niveau de ce dépassement sont importants, plus cela engendrera des dommages, et plus cela nécessitera de s'appuyer sur les puits de carbone naturels et technologiques (capture et séquestration du carbone) pour retourner à la cible initiale.

Sources : GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe III, avril, Chapitre 3, p. 15 ; GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report*, mars, Summary for policymakers, Box SPM.1, Table 1, p. 10

1.4. Des objectifs de décarbonation européens et français plus ambitieux à l'horizon 2030

En France, comme dans l'ensemble des autres pays, les objectifs officiels de réduction des émissions ne s'expriment pas en quote-part de budget carbone mondial, mais en trajectoires annuelles ou pluriannuelles de réduction progressive des émissions jusqu'à l'atteinte de l'objectif ZEN à un horizon précis : 2050.

Des objectifs européens revus à la hausse pour 2030

Le Pacte vert pour l'Europe – feuille de route de la Commission européenne pour parvenir à la neutralité carbone en 2050 – initié en 2019 a abouti à l'adoption de la loi européenne sur le climat en juin 2021. Cette stratégie fixe une cible intermédiaire de réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre de l'Union européenne d'au moins 55 % en 2030 par rapport aux émissions de 1990. Cette nouvelle cible a fait l'objet d'un ensemble de mesures de politique publique en matière de déploiement des énergies renouvelables, d'efficacité énergétique etc. réunies dans le paquet « Ajustement à l'objectif 55 » (*Fit for 55*).

Parmi les principales mesures figurent notamment¹ :

- la réforme du marché carbone européen (Système d'échange de quotas d'émissions – SEQE-UE) :
 - réduction du plafond de quotas dans un objectif de réduction des émissions totales des secteurs couverts de 62 % d'ici 2030 par rapport à 2005 ;
 - extinction progressive des quotas alloués à titre gratuit :
 - entre 2024 et 2026 pour l'aviation (vols intra-européens),
 - entre 2026 et 2034 pour les installations industrielles européennes à forte intensité en émissions (acier, ciment, aluminium, engrais, hydrogène),
 - extension du marché de quotas au transport maritime de manière graduelle à partir de 2024 ;
 - installation à partir de 2027 d'un nouveau marché distinct – le SEQE II – pour la consommation de combustibles dans les secteurs du transport routier et du bâtiment (production de chaleur et de froid), l'industrie manufacturière (hors SEQE I), la construction (des secteurs additionnels comme les yachts et les jets privés peuvent faire l'objet d'une extension volontaire des États membres) ;
- l'instauration au 1^{er} octobre 2023 d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) pour imposer une tarification carbone à certains produits importés au sein de l'UE (acier, ciment, aluminium, engrais, hydrogène, électricité) équivalente à celle

¹ D'après [Citepa](https://www.citepa.eu), [touteurope.eu](https://www.touteurope.eu).

appliquée aux industriels européens. Celle-ci montera progressivement en charge à compter de 2026 en parallèle de la diminution des quotas gratuits, et éviter ainsi plus efficacement les fuites de carbone ;

- la création d'un Fonds social pour le climat (depuis avril 2023), alimenté par une partie des recettes du nouveau SEQE II (65 milliards d'euros) et par le cofinancement des États (22 milliards d'euros), pour accompagner la mise en place du SEQE II et redistribuer une partie des recettes aux ménages et entreprises les plus vulnérables ;
- plusieurs évolutions réglementaires sur la fin des ventes de véhicules à motorisation thermique neufs, le développement des carburants durables dans l'aviation et le transport maritime ou la performance des bâtiments.

Début 2024, la Commission européenne a proposé un *Clean Industrial Act* destiné à soutenir la décarbonation industrielle et le développement des technologies propres.

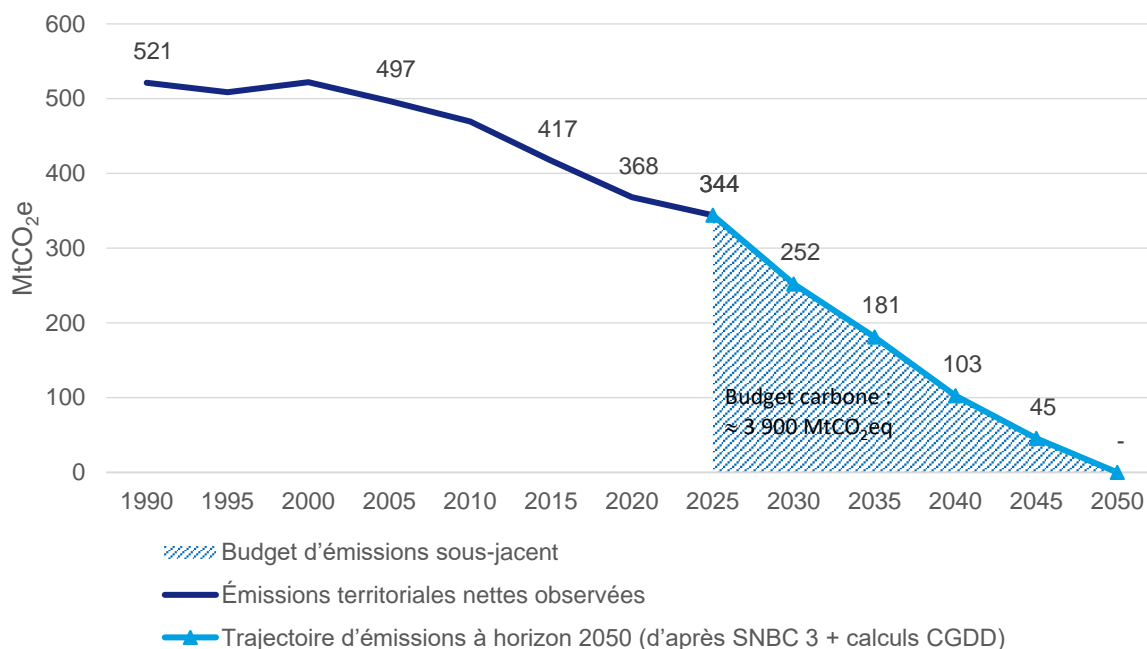
Une montée en charge des politiques à poursuivre en France

La Stratégie nationale bas carbone (SNBC) constitue la feuille de route de la France en matière d'atténuation. Révisée tous les cinq ans, elle doit définir « la marche à suivre pour conduire la politique d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans des conditions soutenables sur le plan économique à moyen et long termes » (L. 222-1 B du Code de l'environnement).

En cohérence avec le paquet législatif européen *Fit for 55*, le projet actuel de SNBC 3 rehausse l'ambition de réduction des émissions pour 2030 : il vise désormais une baisse des émissions brutes de 50 % en 2030 par rapport à 1990, contre 40 % dans la SNBC 2. Ce nouvel objectif implique un rythme annuel moyen de baisse d'émissions d'environ 5 % par an entre 2023 et 2030, supérieur à celui observé en moyenne entre 2019 et 2023 (-3,4 %) (voir Graphique 6). Le Haut Conseil pour le climat (HCC) juge l'objectif 2030 accessible « à condition de consolider rapidement [le cadre d'action publique] et de poursuivre les efforts actuels dans la durée¹ ». Le HCC estime que le rythme observé est compatible avec le projet de SNBC 3 pour les secteurs du bâtiment, de l'agriculture, l'industrie et l'énergie, mais requiert des efforts supplémentaires dans les secteurs des transports et des déchets (voir Tableau 5).

¹ HCC (2024), *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*, op. cit., p. 6.

Graphique 6 – Émissions nettes historiques de GES en France, simulation de la trajectoire de réduction des émissions jusqu'à l'atteinte du ZEN et budget carbone sous-jacent



Lecture : budget carbone estimé en cumulant l'ensemble des émissions annuelles entre 2025 et 2050. La trajectoire étant donnée par pas de temps de cinq ans, on suppose une réduction linéaire des émissions au sein de chaque période de cinq ans.

Sources : Citepa pour les émissions passées ; DGEC, simulations du scénario AMS (run2) en préparation de la SNBC 3 pour 2020-2035, calculs CGDD pour le post-2035, calculs France Stratégie pour le budget carbone

Tableau 5 – Effort de réduction des émissions entre 2023 et 2030 (en MtCO₂e)

Secteurs	Émissions en 2023	Niveau des émissions en 2030 SNBC 3	Effort de réduction 2024-2030
Transports	122,2	90,4	-31,8 (-4,5/an)
Agriculture	75	66,5	-8,5 (-1,2/an)
Industrie de l'énergie	39,7	27,4	-12,3 (-1,7/an)
Industrie manufacturière	66,8	45,2	-21,6 (-3,1/an)
Bâtiment	65	34,8	-30,2 (-4,3/an)
Déchets	14,5	7,2	-7,3 (-1/an)
UTCATF	-18	-19	+1 (0,1/an)
Total brut	379	270	-109 (-15,6/an)
Total net	362	252	-110 (-15,7/an)

Source : commission, d'après les hypothèses SNBC 3 à l'horizon 2030

1.5. Des incertitudes et des avancées

Les puits de carbone naturels et technologiques

L'évolution des puits naturels et technologiques sera déterminante pour l'atteinte de la neutralité carbone. Dans la SNBC 2, les puits étaient évalués à 77 MtCO_{2e} en 2050 dont 67 MtCO_{2e} stockés par des puits naturels et 10 MtCO_{2e} par des puits technologiques¹.

Une dégradation des puits de carbone naturels

Les puits de carbone naturels se sont significativement réduits ces vingt dernières années au regard d'une crise forestière majeure (voir le troisième point de la section 1.1 *supra*), amenant à réévaluer les projections sur la contribution des puits à l'atteinte de l'objectif ZEN. Le projet de SNBC 3 projette, à partir notamment d'une étude de l'IGN et du FCBA², un stockage de 18 MtCO_{2e} par le secteur UTCATF en 2030 (contre 40 MtCO_{2e} dans la SNBC 2).

À l'horizon 2050, la SNBC 2 envisageait une absorption nette de l'ordre de 70 MtCO_{2e} par les puits naturels, dont la moitié par la forêt. Tous les scénarios de l'étude IGN-FCBA aboutissent à des niveaux inférieurs, mais de fortes incertitudes subsistent quant aux effets du changement climatique. Ainsi, à politiques publiques constantes, jusqu'à 35 MtCO_{2e} en 2050 peuvent séparer les scénarios les plus optimistes des plus pessimistes en termes de puits forestier.

Par ailleurs, un ensemble de mesures d'adaptation, intégrées dans le projet de SNBC 3, peuvent être mises en place pour renouveler les forêts et planter des essences adaptées au climat futur de la France. L'impact de ces plans de renouvellement sur le puits de carbone ne pourra être observé qu'à long terme et parfois postérieurement à 2050, lorsque les plantations plantées dans les dix prochaines années atteindront leur maturité et séquestreront chaque année des quantités significatives de carbone.

Pour intégrer les incertitudes liées aux options qui seront définitivement retenues dans la SNBC 3, il apparaît raisonnable de considérer une fourchette de puits UTCATF de 30 à 40 MtCO_{2e} pour 2050.

¹ Hors capture et stockage du carbone (voir plus bas).

² IGN et FCBA (2024), *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français*, rapport d'études, mai. IGN (2023), « *Inventaire forestier national* », Mémento, octobre.

Les technologies de captage, stockage et valorisation du carbone et les puits technologiques

Dans les rapports du GIEC et les orientations de la Commission européenne, le captage du carbone dans le but de le stocker durablement (dans des formations géologiques adaptées), ou de le réutiliser comme intrant dans la fabrication de certains produits (carburants synthétiques, production d'e-méthanol, etc.), est considéré comme un levier nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone, notamment pour la décarbonation des activités pour lesquelles il n'existe pas de technologie bas carbone accessible techniquement ou économiquement.

Diverses technologies existent.

- Les technologies dites de captage, stockage et valorisation du carbone (*Carbon Capture Use and Storage – CCUS*) consistent à capter les émissions de CO₂ issues de la combustion de fossiles ou d'émissions de process (par exemple pour la production de ciment), généralement issues de sites industriels ou de production d'énergie. Le stockage de ces émissions ne permet pas d'obtenir des émissions négatives et ne constitue donc pas un puits, mais il permet d'annuler les émissions des sites industriels concernés. La valorisation de ce CO₂ (*Carbon Capture and Use – CCU*), pour sa part, ne permet aucune réduction d'émission (le CO₂ fossile est réémis lors de la combustion à l'utilisation).
- Les puits technologiques permettent d'obtenir des émissions négatives lorsque les émissions sont stockées. Les technologies d'absorption envisagées dans la SNBC sont les suivantes :
 - Les technologies de captage et de stockage du carbone d'origine biogénique (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage – BECCS*), qui proviennent de la production d'énergie ou du secteur industriel. Elles permettent de capter des émissions biogéniques puis de les stocker dans des couches géologiques profondes.
 - Les technologies de captage direct de CO₂ dans l'air et de stockage (*Direct Air Carbon Capture and Storage – DACCS*), qui retirent du CO₂ de l'atmosphère pour le stocker également en couche géologique. Le recours à ces technologies est cependant incertain, étant donné leur fort besoin en consommation d'énergie, leur coût significatif, l'importante emprise au sol nécessaire et le manque de maturité des projets.
 - Il existe d'autres technologies d'émissions négatives, mais leur maturité est encore moindre et elles ne sont pas considérées dans le scénario à ce stade.
- La valorisation d'émissions biogéniques captées ou issue de la capture directe de CO₂ dans l'air (qui permet une annulation des émissions) n'est pas considérée comme un puits technologique.

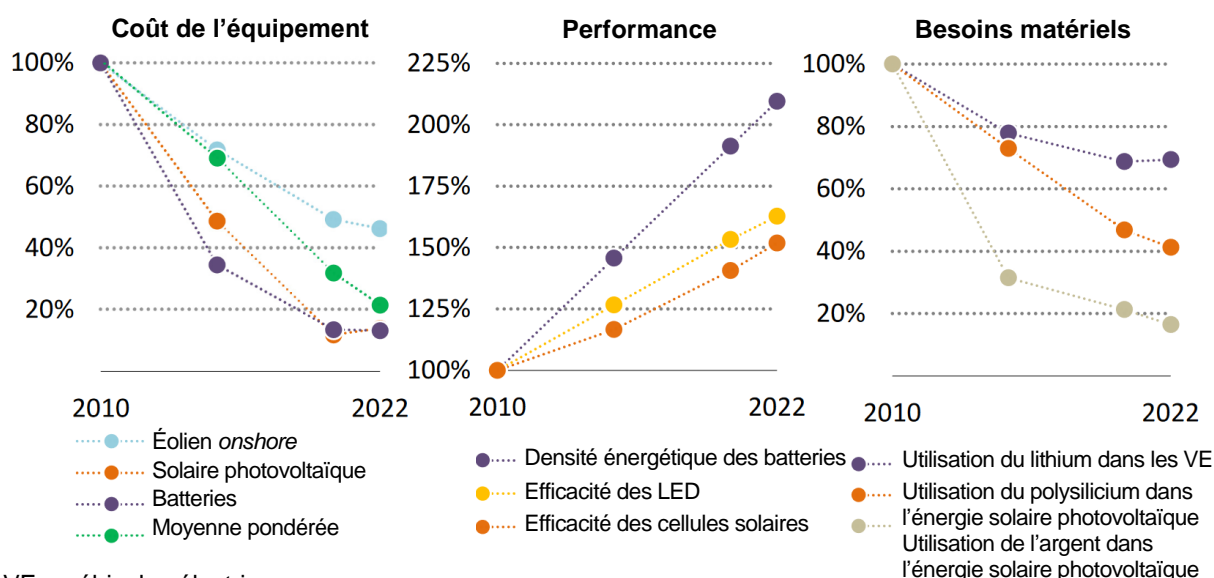
Se fondant sur l'état des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France publié en 2024¹, la SNBC 3 pourrait projeter un captage total entre 15 et 25 Mt de puits technologiques (essentiellement du BECCS).

Au total, les puits technologiques et naturels pourraient représenter entre 45 et 65 Mt en 2050 dans la SNBC 3. L'incertitude sur les effets du changement climatique peut cependant conduire à considérer une fourchette plus large, de 25 à 80 Mt.

Des avancées technologiques

Le développement et le déploiement des technologies énergétiques propres au niveau mondial a été particulièrement dynamique au cours des dernières années² : déploiement de l'énergie solaire photovoltaïque, ventes de voitures électriques et installation de batteries stationnaires, ventes de pompes à chaleur.

Graphique 7 – Évolution des coûts d'équipement, performance et besoins de matériaux par unité pour quelques technologies bas carbone entre 2010 et 2022



VE = véhicules électriques.

Notes : valeur de l'indice en 2010 = 100 %. Les coûts d'équipement sont donnés en valeur réelle et n'incluent pas les coûts d'ingénierie, d'approvisionnement, de construction et d'installation. La moyenne pondérée (« weighted average ») des coûts d'équipement compare les coûts agrégés du déploiement annuel des technologies bas carbone (photovoltaïque, vent, batteries) aux coûts en l'absence de diminution depuis 2010.

Source : AIE (2023), *Net Zero Roadmap...*, op. cit., figure 1.22, p. 49

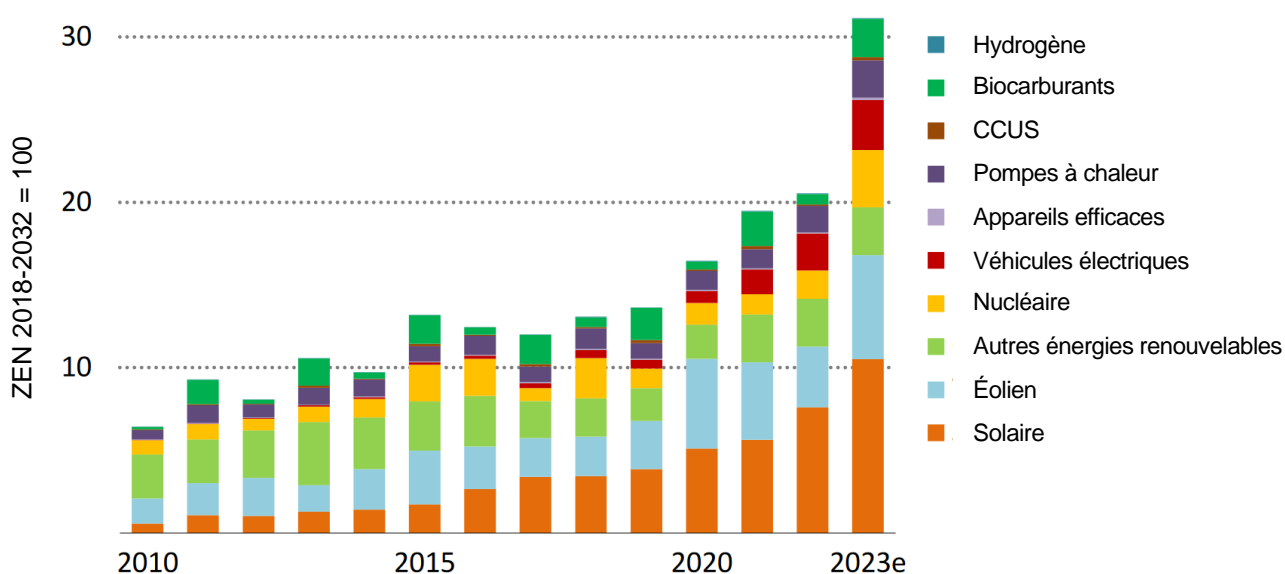
¹ DGE et DGEC (2024), *L'état des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France*, Direction générale des Entreprises et Direction générale de l'Énergie et du Climat, juillet.

² AIE (2023), *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*, rapport, Agence internationale de l'énergie, septembre.

Ces déploiements ont permis de réduire les coûts, d'améliorer les performances et de diminuer les besoins en matériaux. Les coûts de certaines technologies d'énergie propre fabriquées en série – notamment le solaire photovoltaïque, l'éolien, les pompes à chaleur et les batteries – ont ainsi chuté de près de 80 % au total (voir Graphique 7).

Afin de fournir un résumé succinct des évolutions, le rapport de l'AIE (2023) a créé un indice de déploiement des technologies propres (*Clean Technology Development Index - CTDI*)¹, qui donne une mesure globale de la distance qui sépare les niveaux actuels de déploiement des énergies propres du niveau requis en 2030 dans le scénario ZEN². Ainsi, en 2022, environ 20 % du déploiement nécessaire a été réalisé, le solaire et l'éolien représentant plus de la moitié de ce déploiement (voir Graphique 8).

Graphique 8 – Indice de développement des technologies propres entre 2010 et 2023



Note : CCUS = *Carbon Capture, Utilisation and Storage*. 2023e = valeurs estimées pour 2023 à partir des données disponibles.

Source : AIE (2023), *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*, rapport, Agence internationale de l'énergie, septembre, figure 1.16, p. 41

¹ Le CTDI a été développé : (i) en rassemblant des données sur le déploiement annuel historique des technologies énergétiques propres et en fournissant une estimation du déploiement attendu en 2023, (ii) en indexant les valeurs annuelles historiques de chaque technologie sur le déploiement annuel moyen de cette technologie dans le scénario ZEN pour la période 2028-2032 et (iii) en pondérant chaque technologie en fonction de sa part dans les réductions d'émissions mondiales dans le scénario ZEN en 2030.

² AIE (2023), *Net Zero Roadmap...*, *op. cit.*

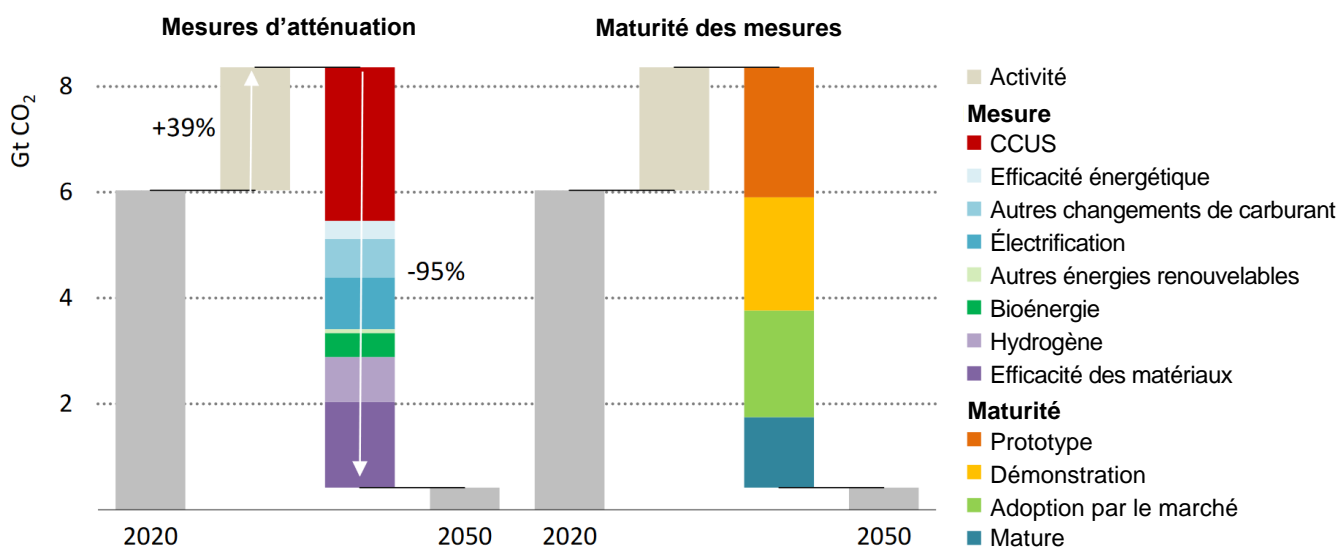
Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années¹ sur des technologies encore peu matures : dans le captage, stockage et valorisation du carbone (*Carbon Capture Use and Storage* – CCUS), dans la production d'énergie (petits réacteurs nucléaires modulaires), l'approvisionnement en hydrogène à faibles émissions (électrolyseurs à oxyde solide), le transport (batteries sodium-ion pour les véhicules électriques, biocarburants liquides de deuxième et troisième génération²), l'industrie lourde (projets LEILAC-2 pour le ciment, HYBRIT pour le fer et ELYSIS pour l'aluminium), les matériaux critiques (biolixiviation pour le recyclage des déchets électroniques et la récupération des métaux, extraction directe de lithium à partir de saumures géothermiques), le captage direct dans l'air (projet islandais), l'aviation (carburants d'aviation durable), ou le transport maritime (utilisation du gaz naturel bio-liquéfié à faibles émissions, moteur à deux temps à l'ammoniac, grands porte-conteneurs fonctionnant au méthanol, ferries à pile hydrogène).

Des innovations restent nécessaires pour permettre la décarbonation des secteurs de l'industrie lourde (voir Graphique 9) et le transport à longue distance. Par ailleurs, l'utilisation de l'hydrogène bas carbone comme vecteur intermédiaire pour le stockage d'électricité (et non une utilisation directe) présente pour le moment un faible rendement, les coûts de production étant actuellement trop élevés pour être compétitifs (raison pour laquelle l'hydrogène « gris », produit à partir de gaz fossile, domine largement).

¹ IEA Clean Energy Technology Guide: <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>

² Les biocarburants liquides regroupent les carburants liquides dérivés de la biomasse ou de déchets, tels que l'éthanol, le biodiesel et les biocarburants. Ils peuvent être classés en biocarburants conventionnels et avancés en fonction de la combinaison des matières premières et des technologies utilisées pour les produire et de leur maturité respective. La recherche sur les biocarburants de deuxième et troisième générations est aujourd'hui privilégiée, notamment pour limiter les problématiques liées à l'usage des sols dans le cas des biocarburants de première génération.

Graphique 9 – Émissions mondiales de CO₂ dans l'industrie lourde et levier de réduction selon la maturité des mesures, dans le scénario « Zéro émission nette » de l'AIE



CCUS = Carbon Capture, Utilisation and Storage.

Lecture : l'hydrogène et les technologies de CCUS contribuent pour moitié à la baisse des émissions dans l'industrie lourde d'ici 2050 dans le scénario ZEN. Parmi l'ensemble des mesures disponibles, environ un tiers est à l'état de prototype, environ un sixième seulement est considéré comme « mature ».

Source : AIE (2021), *Net Zero 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, rapport, Agence internationale de l'énergie, mai, figure 3.16, p. 123

Une meilleure appréhension des chemins de transition : une exigence de cohérence technique et économique

L'atteinte des objectifs de la SNBC 3 emporte deux types d'enjeux¹ :

- Des enjeux de cohérence technique : assurer la compatibilité entre électrification des usages et évolution de la production électrique (bouclage électrique), entre offre et besoin en biomasse (bouclage biomasse), entre surfaces consommées (par exemple, augmentation de la surface forestière) et surfaces libérées (par exemple, diminution des surfaces pour l'alimentation animale), ainsi qu'en matière de métaux critiques.
- Des enjeux de cohérence économique et de justice sociale : assurer le juste équilibre entre leviers technologiques et comportementaux, anticiper les conséquences en matière de création et destructions d'emplois et les besoins d'accompagnement pour la restructuration des filières, tenir compte de l'évolution du climat pour assurer la résilience des actions.

¹ Gouvernement (2024), *Projet de Stratégie nationale bas-carbone n° 3...*, op. cit., p. 139.

Relativement faibles tant que la transition était envisagée comme un processus de longue haleine, les enjeux macroéconomiques de court terme de la transition deviennent un thème important des politiques publiques. Dans cette perspective, l'analyse de l'impact macroéconomique sur la croissance, l'emploi, l'inflation, les finances publiques et la compétitivité mais aussi l'étude des impacts sectoriels et de l'incidence distributive de la transition climatique ont sensiblement progressé ces dernières années.

Le Réseau pour le verdissement du système financier (Network for Greening the Financial System - NGFS)¹, par exemple, a établi un ensemble de scénarios décrivant le poids relatif des risques physiques et des risques de transition². Les risques physiques, qui résultent de la hausse des températures et de l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, ont un caractère permanent ; les risques de transition, induits par l'action climatique, sont en revanche principalement liés aux conséquences macroéconomiques des politiques de décarbonation, aux risques d'obsolescence accélérée du capital en place et des compétences, à l'incertitude quant au développement de nouvelles technologies, ou encore aux changements de préférence des agents. Différents scénarios montrent les gains d'une action résolue mais ordonnée, coordonnée au niveau international.

La Direction générale du Trésor montre dans le même temps, dans son rapport sur les enjeux de la neutralité carbone pour l'économie française³, qu'une évolution non maîtrisée du changement climatique aurait des conséquences négatives importantes pour l'économie, justifiant des objectifs de réduction mondiale des émissions ambitieux. Le rapport souligne que la transition vers la neutralité carbone ne se fera pas sans investissements importants, dont le financement devra être partagé entre secteurs public et privé. C'était déjà l'un des messages du rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023)⁴ qui

¹ Le NGFS est le réseau spécialisé des banques centrales et des superviseurs financiers. NGFS (2022), *NGFS Climate Scenarios for Central Bankers and Supervisors*, Network for Greening the Financial System, septembre.

² Ces scénarios sont classés en quatre catégories : « les scénarios de transition ordonnée, où celle-ci commence immédiatement et progresse graduellement ; les scénarios de transition désordonnée, où le risque de transition est plus élevé car celle-ci est retardée ; les scénarios "hot-house world", qui sont sans transition et avec un risque physique élevé ; et les scénarios "too little, too late", avec des risques de transition et physiques élevés. Voir de Gaye A. et Payerols C. (2024), « *Nouveaux scénarios NGFS (phase 4) : impacts économiques pour la France* », Billet de blog n° 355, la Banque de France, mai.

³ DG Trésor (2023), *Rapport intermédiaire. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, décembre ; *id.* (2025), *Rapport final. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, janvier.

⁴ France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat*, rapport à la Première ministre, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, mai.

évaluait à plus de 2 points de PIB environ les besoins d'investissement liés à la transition énergétique d'ici 2030¹.

2. L'enjeu de la valorisation des émissions de gaz à effet de serre

L'analyse économique aborde le climat sous l'angle d'un bien collectif à préserver ou d'une externalité négative (émissions de CO₂) à internaliser dans le fonctionnement des marchés. Il s'agit, on l'a dit, d'une externalité « de stock », le réchauffement climatique étant provoqué par l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

2.1. Deux approches de valorisation du carbone : coûts-bénéfices et coûts-efficacité

La définition de la valeur du carbone peut concrètement renvoyer à plusieurs types de demande.

La première, dite « coûts-bénéfices », consiste à déterminer un coût social du carbone, qui égalise à tout instant le coût marginal d'abattement d'une tonne de gaz à effet de serre (GES) et la somme actualisée des dommages marginaux futurs d'une tonne de GES émise aujourd'hui. À cet optimum socioéconomique, on s'assure contre deux risques : celui de faire des efforts démesurés pour un bénéfice social faible ; celui de ne pas faire suffisamment d'effort alors que le coût à supporter est faible pour un bénéfice important.

Une seconde démarche, dite « coûts-efficacité », consiste à déterminer la valeur du carbone permettant d'atteindre un objectif climatique au moindre coût. Cette démarche permet de s'affranchir d'un exercice de valorisation et d'actualisation des dommages, dans la mesure où la courbe de dommage marginal est remplacée par une cible d'émissions. Sa pertinence dépend à la fois de la légitimité de la cible et d'une bonne appréciation des coûts marginaux d'abattement, c'est-à-dire des coûts de réduction des émissions de GES liés notamment au portefeuille de technologies disponibles et prévisibles (voir Encadré 3).

¹ Ce surcroît d'investissements nets atteindrait +63 milliards d'euros par an en 2030 par rapport à 2021 d'après une récente analyse de la DG Trésor : Gourmand L. (2024), « [Quels besoins d'investissements pour les objectifs français de décarbonation en 2030 ?](#) », *Trésor-Éco*, n° 342, avril.

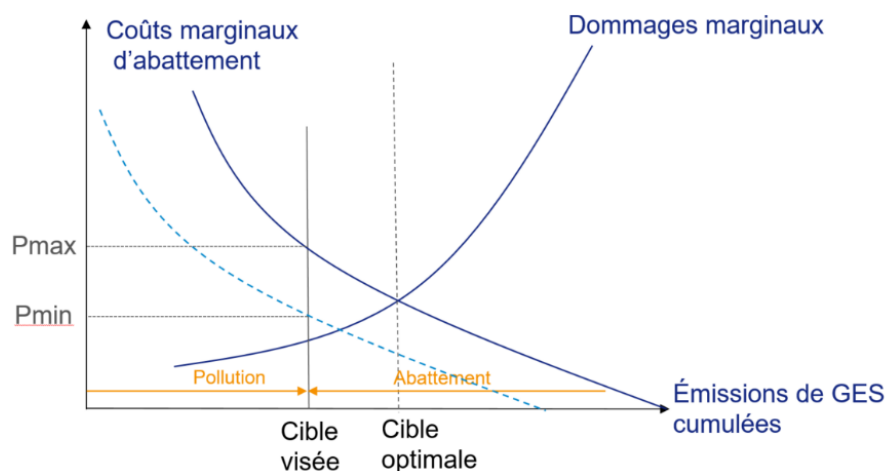
Encadré 3 – L’approche coûts-bénéfices et l’approche coûts-efficacité

L’approche coûts-bénéfices

Dans cette approche, l’efficacité commande de minimiser le coût complet du changement climatique – constitué des coûts d’abattement des émissions et du coût des dommages résiduels – et d’en déduire la trajectoire optimale des émissions. Cette approche conduit à assurer à tout moment d’égalité entre le coût marginal des dommages associés à l’émission d’une tonne supplémentaire de CO₂ dans l’atmosphère et le coût marginal de réduction des émissions de CO₂.

Ce principe constitue le socle de l’analyse coûts-bénéfices. C’est ce qu’illustre le graphique simplifié ci-dessous, où sont représentées la courbe du coût marginal des dommages et la courbe du coût marginal d’abattement. Plus la concentration de CO₂ est importante, plus le coût des dommages résultant d’une émission supplémentaire augmente ; plus on diminue la concentration de CO₂, plus le coût marginal d’abattement augmente. L’égalisation des coûts marginaux permet de dégager une quantité optimale d’émission Q* et le prix qui lui est lié p* (voir Graphique 10).

Graphique 10 – Approches coûts-bénéfices



Source : commission

L’approche coûts-efficacité

Une seconde approche consiste à définir *ex ante* un objectif de réduction des émissions situé dans les plages de valeurs raisonnables issues de l’analyse coûts-bénéfices. L’analyse économique peut, une fois l’objectif défini au niveau politique,

prendre en compte cette cible (qui, dans l'exemple du Graphique 10, est supposée inférieure à la cible optimale) et travailler sur le seul volet coûts-efficacité.

La valeur d'équilibre dépend principalement de deux variables :

- le niveau des objectifs de réduction des émissions. Plus l'objectif est ambitieux plus le coût marginal d'abattement est élevé ;
- les technologies disponibles pour réduire les émissions. Plus les technologies sont performantes, plus les coûts marginaux d'abattement sont faibles (voir P_{max} et P_{min} sur le Graphique 10).

2.2. L'approche coûts-efficacité : optimisation d'un budget carbone ou respect d'une trajectoire de flux

Le GIEC a estimé des budgets carbone pour établir le montant des cumuls d'émissions de CO₂ à ne pas dépasser dans l'objectif de contenir l'élévation des températures en-deçà de certains seuils (voir section 1.3 *supra*). À partir de cet objectif, une approche coût-efficacité peut théoriquement se fonder sur l'optimisation intertemporelle d'un budget carbone (voir Encadré 4 *infra*) : le calcul d'optimisation consiste à déterminer une valeur de l'action pour le climat initiale en fonction de la taille du budget, de la disponibilité et du coût des technologies de décarbonation, sans se fixer de jalon intermédiaire (2030, 2040) ni même d'échéance finale (par exemple 2050), l'essentiel étant que les émissions cumulées ne dépassent pas *in fine* le budget carbone. Cette optimisation intertemporelle des efforts conduit à une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat qui croît au même rythme que le taux d'actualisation (la « règle de Hotelling »¹). En d'autres termes, la valeur de l'action pour le climat est constante en valeur actualisée.

La règle de Hotelling n'épuise pas à elle seule la question du choix de la répartition des efforts de décarbonation dans le temps. Des arguments économiques de prudence²

¹ Hotelling H. (1931), « The economics of exhaustible resources », *Journal of Political Economy*, vol. 39(2), avril, p. 137-175.

² La prudence se distingue de l'aversion au risque : l'aversion au risque (dérivée seconde de la fonction d'utilité) indique dans quelle mesure on souffre du risque/incertitude ; la prudence (dérivée troisième de la fonction d'utilité) indique comment on change son comportement face à l'incertitude. La prudence conduit à des comportements de précaution. À l'instar d'un ménage prudent accumulant une épargne de précaution quand ses revenus futurs deviennent plus incertains, il est socialement désirable d'augmenter l'effort initial d'abattement pour s'offrir une « épargne de précaution » dans un contexte de forte incertitude initiale, quelle que soit son origine, pour absorber les mauvaises nouvelles.

peuvent plaider pour un effort initial plus important, c'est-à-dire une valeur initiale élevée et un rythme de croissance de la valeur inférieur au taux d'actualisation. Notamment :

- en présence d'incertitude sur l'objectif pertinent de réduction d'émissions (équivalente à une incertitude sur les revenus futurs), la stratégie optimale consiste à surélever la marche initiale (augmentation des efforts de réduction des émissions de GES aujourd'hui à titre de précaution, équivalente à une hausse de l'épargne de précaution) puis à laisser croître la valeur de l'action pour le climat à un taux plus faible que le taux d'intérêt pour être en mesure d'affronter sans heurts le choc potentiel induit par une révision de la cible à mi-parcours ;
- l'incertitude sur le progrès technique « vert » (donc sur les coûts d'abattement) renforce cet effet de précaution. Dans la mesure où le coût marginal d'abattement futur est incertain (équivalent à une incertitude sur le rendement futur de l'épargne), la prudence conduit à anticiper les efforts de réduction d'émissions (équivalent à un effort d'épargne supplémentaire).

Encadré 4 – Modélisation théorique simple de la gestion d'un « budget carbone »

L'approche de gestion d'un budget carbone, théorisée par le modèle de Hotelling dans le cadre de la gestion des ressources épuisables, consiste à minimiser le coût actualisé des efforts de réduction des émissions permettant de respecter le budget global fixé. On considère :

- que les agents économiques retirent une utilité $U(R_t)$ de la consommation à l'instant t des énergies fossiles ;
- qu'on dispose d'un taux d'actualisation ρ qui permet de pondérer ces différentes utilités en fonction du temps.

On cherche alors à optimiser la consommation dans le temps de cette ressource fossile pour maximiser la somme de toutes les utilités pondérées :

$$\max_{R_t} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(R_t) dt$$

Cette maximisation est réalisée sous deux contraintes¹ :

$$\dot{M} = \varepsilon R_t$$

$$M_t < Z$$

M_0 étant donné.

La première contrainte considère que les émissions cumulées M augmentent avec la consommation d'énergies fossiles R^2 , le coefficient ε mesurant l'intensité polluante des énergies fossiles.

La seconde contrainte considère que les émissions cumulées ne doivent pas dépasser un niveau considéré comme dangereux noté Z . Il n'y a pas de jalon intermédiaire pour la décarbonation ni même d'échéance finale : rien n'assure donc que l'économie est entièrement décarbonée en 2050. Dans ce modèle très simple, comme il n'y a pas de substitut à la ressource fossile, on conserve même indéfiniment un tout petit peu de fossile.

L'outil mathématique associé à chacune de ces contraintes des coefficients qui permettent la résolution du problème et dont le sens économique est le suivant :

- μ_t , désignant le prix implicite du stock de carbone (valeur carbone)
- ω_t , multiplicateur associé à la contrainte de concentration. Il est nul si la contrainte n'est pas atteinte, positif dans le cas contraire.

À l'optimum les relations suivantes sont vérifiées :

$$U'(R_t) = \varepsilon \mu_t$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \rho - \frac{\omega_t}{\mu_t}$$

¹ Contrairement au rapport Quinet (2008), nous avons ici omis la contrainte de rareté des fossiles, ces derniers étant maintenant reconnus exister en trop grande quantité pour pouvoir être intégralement utilisés sans catastrophe climatique. Voir McGlade C. et Ekins P. (2015), « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2C », *Nature*, vol. 517(7533), janvier, p. 187-190.

² Dans le rapport Quinet (2008), la seconde contrainte considère que la concentration de CO_2 , M , augmente avec les émissions qui sont, elles, proportionnelles à l'extraction de R (d'un coefficient constant ε) et diminue avec l'absorption naturelle du CO_2 (qui est égale à une fraction α de la concentration de l'atmosphère en CO_2). Il est désormais admis que la température globale dépend des émissions cumulées, voir Dietz S. et Venmans F. (2019), « [Cumulative carbon emissions and economic policy: In search of general principles](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 96(C), p. 108-129.

La valeur de l'action pour le climat croît sur ce chemin optimal au taux d'actualisation, c'est-à-dire qu'elle suit la règle de Hotelling.

L'anticipation d'une technologie *backstop*, c'est-à-dire d'une technologie de substitution au pétrole, ou une approche optimiste sur la baisse future des coûts marginaux d'abattement peut à l'inverse conduire à réduire l'effort initial et à assumer une progressivité plus forte. Retarder les efforts n'est pas un problème si l'on croit à l'émergence de solutions technologiques efficaces dans le futur.

Il est également possible de mettre en œuvre une approche coûts-efficacité lorsque l'objectif de décarbonation prend la forme non pas d'un budget carbone, mais d'une trajectoire cible de réduction progressive des flux d'émissions annuels ou pluriannuels. Dans les faits, c'est ce type d'objectifs que se sont fixés les pays signataires de l'Accord de Paris et la France en particulier (voir section 1.4 *supra*).

Cette approche présente, du point de vue des politiques publiques, deux intérêts :

- elle permet de piloter la trajectoire de réduction des émissions en intégrant de manière explicite des contraintes d'ajustement et de transition, conduisant à organiser une montée en puissance progressive des efforts dans le temps ;
- elle permet de fixer des jalons intermédiaires dont on peut vérifier le respect.

Cette approche présente en pratique deux différences importantes par rapport à une approche en budget carbone :

- le taux d'actualisation ne joue aucun rôle direct dans la détermination de la trajectoire ;
- elle ne garantit pas la neutralité intertemporelle des efforts, avec, dans les faits, une certaine tendance à décaler les efforts dans le temps par rapport à l'approche en budget carbone – ce qui se traduit dans les trajectoires de la valeur de l'action pour le climat par des pentes supérieures au taux d'actualisation.

Tableau 6 – Éléments de comparaison entre les différentes approches pour calculer une valeur du carbone

	Approche coûts-bénéfices	Approche coûts-efficacité avec budget carbone	Approche coûts-efficacité en flux
Objectif(s) de décarbonation sous-jacent(s)	Déterminé par la confrontation entre coûts d'abattement marginaux et dommages marginaux	Fixé <i>ex ante</i> (par exemple par l'Accord de Paris)	Fixés <i>ex ante</i> par une trajectoire d'émissions pluriannuelle
Caractéristiques principales de la trajectoire de valeur du carbone obtenue	Croissante en raison de dommages augmentant dans le temps	Croissante au taux d'actualisation	Croissante à un taux qui varie selon le profil de la trajectoire d'efforts
Rôle du taux d'actualisation socioéconomique	Actualisation des dommages	Entre directement dans le calcul de la pente de la trajectoire	Diffus, à travers les décisions d'investissement
Sources principales d'incertitudes	Évaluation des dommages	Évaluation des coûts marginaux d'abattement	Évaluation des coûts marginaux d'abattement

Source : commission

Le tableau 6 ci-dessus récapitule les différents éléments de comparaison entre les différentes approches. Dans le cadre d'une approche coûts-bénéfices, l'objectif de décarbonation est fourni par la confrontation entre dommages marginaux et coûts marginaux d'abattement. Il est doublement sensible à l'incertitude, celle sur les dommages marginaux et celle sur les coûts marginaux d'abattement. L'objectif est exogène dans l'approche coûts-efficacité, fondé sur des décisions politiques elles-mêmes adossées à des travaux scientifiques. Lorsque cette approche est appliquée avec un budget carbone, la trajectoire obtenue relève de la règle de Hotelling, avec un taux de croissance correspondant au taux d'actualisation. Ce n'est pas le cas dans une approche en flux.

2.3. L'approche coûts-bénéfices : les progrès réalisés dans la valorisation des dommages

L'approche coûts-bénéfices suppose que l'on puisse estimer et actualiser les flux de dommages issus du réchauffement climatique à partir d'hypothèses de concentration atmosphérique de GES et de hausse des températures. Les controverses qui ont entouré

la publication du rapport Stern (2006)¹ témoignent de la sensibilité des résultats aux différents paramètres retenus, notamment : le calibrage de la relation entre températures et dommages ; le taux auquel on actualise les dommages évalués sur un horizon de très long terme.

La recherche académique a toutefois progressé au fil du temps dans l'évaluation des dommages. La modélisation de la dynamique du système terrestre² s'est affinée. Les principaux modèles économiques avaient par le passé largement surestimé le délai entre les émissions de carbone et le réchauffement, et ignoré la saturation des puits de carbone qui se produit lorsque la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone augmente³. Si l'on fait l'hypothèse que les dommages sont une fonction convexe du réchauffement, le coût social du carbone augmente plus rapidement que la production globale⁴. Des points de bascule (*tipping points*) ont par ailleurs été intégrés aux modélisations⁵ les plus récentes.

Enfin, des avancées ont été réalisées en matière de prise en compte des dommages climatiques causés aux biens non marchands, tels que les systèmes naturels ou le patrimoine culturel⁶, au-delà des dommages affectant directement le PIB marchand.

¹ Stern N. (2006), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press.

² Otto A., Todd B. J., Bowerman N., Frame D. J. et Allen M. R. (2013), « [Climate system properties determining the social cost of carbon](#) », *Environmental Research Letters*, vol. 8(2), juin.

³ Dietz S. et Venmans F. (2019), « [Cumulative carbon emissions and economic policy...](#) », *op. cit.*

⁴ Quantitativement, cet effet ajoute environ 0,5 point de pourcentage au taux de croissance initial du prix optimal – c'est-à-dire le coût social – du carbone selon les valeurs centrales des paramètres, pour tomber à environ zéro dans cent ans. Voir *ibid.*

⁵ Nordhaus W. (2019), « [Economics of the disintegration of the Greenland ice sheet](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116(25), juin, p. 12261-12269. Lemoine D. et Traeger C. P. (2016), « Economics of tipping the climate dominoes », *Nature Climate Change*, vol. 6, p. 514-519. Cai Y., Judd K. L., Lenton T. M., Lontzek T. S. et Narita D. (2015), « [Environmental tipping points significantly affect the cost-benefit assessment of climate policies](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112(15), avril, p. 4606-4611. Dietz S., Rising J., Stoerk T. et Wagner G. (2021), « [Economic impacts of tipping points in the climate system](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118(34), août.

⁶ Sterner T. et Persson M. U. (2008), « [An even sterner review: Introducing relative prices into the discounting debate](#) », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 2(1), hiver, p. 61-76. Bastien-Olvera B. A. et Moore F. C. (2021), « Use and non-use value of nature and the social cost of carbon », *Nature Sustainability*, vol. 4(2), février, p. 101-108. Weitzman M. L. (2010), « What is the "damages function" for global warming – And what difference might it make? », *Climate Change Economics*, vol. 1(1), p. 57-69. Drupp M. A. et Hänsel M. C. (2021), « Relative prices and climate policy: How the scarcity of nonmarket goods drives policy evaluation », *American Economic Journal: Economic Policy*, vol. 13(1), février, p. 168-201.

2.4. Une tendance à la hausse des estimations de coût social du carbone

Aux États-Unis, jusqu'à l'arrivée de l'administration Trump, l'EPA (Environmental Protection Agency), ainsi que d'autres agences fédérales, utilisaient traditionnellement un coût social du carbone pour valoriser les impacts climatiques des politiques mises en œuvre¹. Un groupe de travail inter-agences (Interagency Working Group - IWG) était chargé depuis 2009 d'harmoniser cette valeur et, depuis 2016, de l'actualiser en collaboration avec un comité issu de l'Académie des Sciences (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine). En 2016, sous l'hypothèse d'un taux d'actualisation de 3 %, le coût social du carbone moyen avait ainsi été estimé à 42 \$₂₀₀₇/tCO₂ pour l'année 2020, avec une trajectoire croissante jusqu'à 69 \$₂₀₀₇/tCO₂ pour l'année 2050.

L'analyse de l'EPA² avait progressivement intégré un certain nombre d'améliorations de la modélisation qui la rendaient plus proche de l'ensemble des études académiques³, y compris une meilleure représentation du système terrestre, des taux d'actualisation plus bas que dans la période 2017-2020, et une inclusion plus complète des incertitudes paramétriques qui touchent la croissance économique, les dommages climatiques et la dynamique du système terrestre.

Les dernières valeurs sont sensiblement plus élevées que celles obtenues en 2016. Elles s'échelonnent entre 110 et 370 \$/tCO₂ pour l'année 2020 et entre 200 et 370 \$/tCO₂ pour l'année 2050, selon la fonction de dommages retenue et le taux d'actualisation (voir Tableau 7). La croissance du coût social du carbone au cours du temps reflète l'augmentation des dommages marginaux à mesure que la température croît. Elle est cependant inférieure au taux d'actualisation, ce qui implique que sa valeur actualisée diminue avec l'horizon.

L'adoption d'un *executive order* (décret présidentiel) par le président Donald Trump vient cependant remettre en cause la valeur et l'utilisation même du coût social du carbone aux États-Unis⁴.

¹ EPA (2017), *Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan: Proposal*, U.S. Environmental Protection Agency, octobre.

² EPA (2023), *Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances*, U.S. Environmental Protection Agency, novembre.

³ Pour un développement plus exhaustif, voir Pommeret A. (2024), « *Commentaire – Le défi du siècle et la science économique* », *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, n° 544, décembre.

⁴ « (c) *The calculation of the “social cost of carbon” is marked by logical deficiencies, a poor basis in empirical science, politicization, and the absence of a foundation in legislation. Its abuse arbitrarily slows regulatory decisions and, by rendering the United States economy internationally uncompetitive, encourages a greater human impact on the environment by affording less efficient foreign energy producers a greater share of the global energy and natural resource market. Consequently, within 60 days of the date of this order, the Administrator of the EPA shall*

Tableau 7 – Coût social du carbone selon le module de fonction de dommages et le taux d'actualisation de court terme

	Taux d'actualisation Ramsey de court terme selon le module de dommages								
	2,5 %			2 %			1,5 %		
Année	DSCIM	GIVE	méta-analyse	DSCIM	GIVE	méta-analyse	DSCIM	GIVE	méta-analyse
2020	110	120	120	190	190	200	330	310	370
2030	140	150	150	230	220	240	390	350	420
2040	170	170	170	280	250	270	440	390	460
2050	210	200	200	330	290	310	500	430	520
2060	250	220	230	370	310	350	550	470	570
2070	280	240	250	410	340	380	600	490	610
2080	320	260	280	450	360	410	640	510	650

DSCIM : Data-driven Spatial Climate Model. GIVE : Greenhouse Gas Impact Value Estimator.

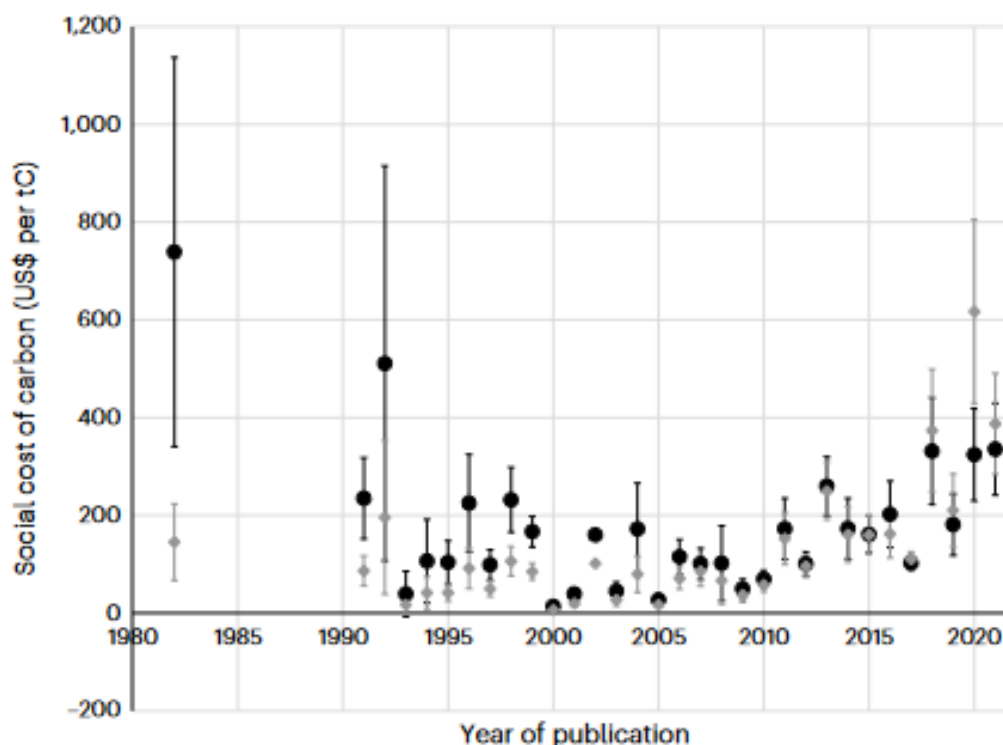
Source : EPA (2023), [Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances](#), U.S. Environmental Protection Agency, novembre, tableau 3.1.1, p. 78

Au-delà des évaluations réalisées par les agences publiques américaines, Tol (2023)¹, à partir d'une méta-analyse sur 5 905 estimations dans 207 articles publiés avant 2022, montre qu'au cours des dix dernières années, les estimations du coût social du carbone sont passées de 9 \$/tCO₂ à 40 \$/tCO₂ pour un taux d'actualisation élevé, et de 122 \$/tCO₂ à 525 \$/tCO₂ pour un taux d'actualisation faible. Cette tendance à la hausse (voir Graphique 11) est statistiquement significative si l'on tient compte des analyses de sensibilité et d'une pondération par la qualité des articles. Elle s'explique à la fois par le choix de taux d'actualisation plus faibles et d'une plus grande précision des évaluations.

issue guidance to address these harmful and detrimental inadequacies, including consideration of eliminating the "social cost of carbon" calculation from any Federal permitting or regulatory decision. » Source : Maison Blanche (2025), « [Unleashing American Energy](#) », Executive Order n° 3418, 3 février.

¹ Tol R. S. J. (2023), « Social cost of carbon estimates have increased over time », *Nature Climate Change*, vol. 13, p. 532-536.

Graphique 11 – Coût social du carbone moyen par année de publication



Lecture : les losanges gris représentent les coûts tels que reportés, les points noirs sont corrigés de l'inflation et l'année d'émission. Les marges d'erreur sont représentées par les barres.

Source : Tol R. S. J. (2023), « Social cost of carbon estimates have increased over time », *Nature Climate Change*, vol. 13, p. 532-536, ici figure 1 p. 533

Moore *et al.* (2024)¹, à partir d'une autre méta-analyse, montrent que la distribution des valeurs publiées pour 2020 a une moyenne tronquée (lorsque sont exclus les 0,1 % supérieurs et inférieurs de la distribution) de 132 \$/tCO₂ avec une queue de distribution épaisse à droite. Cet article combine aussi l'analyse de la littérature avec des évaluations d'experts pour générer une distribution synthétique du coût social du carbone. La moyenne de cette distribution est estimée à 283 \$/tCO₂ pour 2020, ce qui est plus élevé que toutes les estimations officielles du gouvernement, y compris la mise à jour de 2023 de l'EPA des États-Unis. Une étude récente obtient même une valeur supérieure à 1 000 \$/tCO₂².

¹ Moore F. C., Drupp M. A., Rising J., Dietz S., Rudik I. et Wagner G. (2024), « Synthesis of evidence yields high social cost of carbon due to structural model variation and uncertainties », NBER Working Paper n° 32544, National Bureau of Economic Research, juin.

² Bilal A. et Känzig D. R. (2024), « The Macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature », NBER Working Paper n° 32450, National Bureau of Economic Research, mai.

2.5. L'estimation des valeurs carbone dans l'approche coût-efficacité

L'approche coût-efficacité a fait l'objet de travaux académiques en Europe surtout, initiés par Michel Moreaux¹. Le Royaume-Uni est, avec la France, l'un des rares pays à avoir une valeur du carbone basée sur l'approche coût-efficacité. Le Royaume-Uni a adopté une approche coûts-efficacité en 2009, les valeurs du carbone ayant été mises à jour en 2021 en cohérence avec l'objectif ZEN (voir Tableau 8)².

**Tableau 8 – Valeurs du carbone au Royaume-Uni cohérentes avec l'objectif ZEN
(en livres sterling 2020 par tonne de CO₂)**

Année	Valeur basse	Valeur centrale	Valeur haute
2020	120	241	361
2025	130	260	390
2030	140	280	420
2035	151	302	453
2040	163	326	489
2045	176	351	527
2050	189	378	568

Note : une marge d'incertitude de plus ou moins 50 % entoure la valeur centrale.

Source : Gouvernement britannique (2021), « *Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation* », Policy Paper, septembre

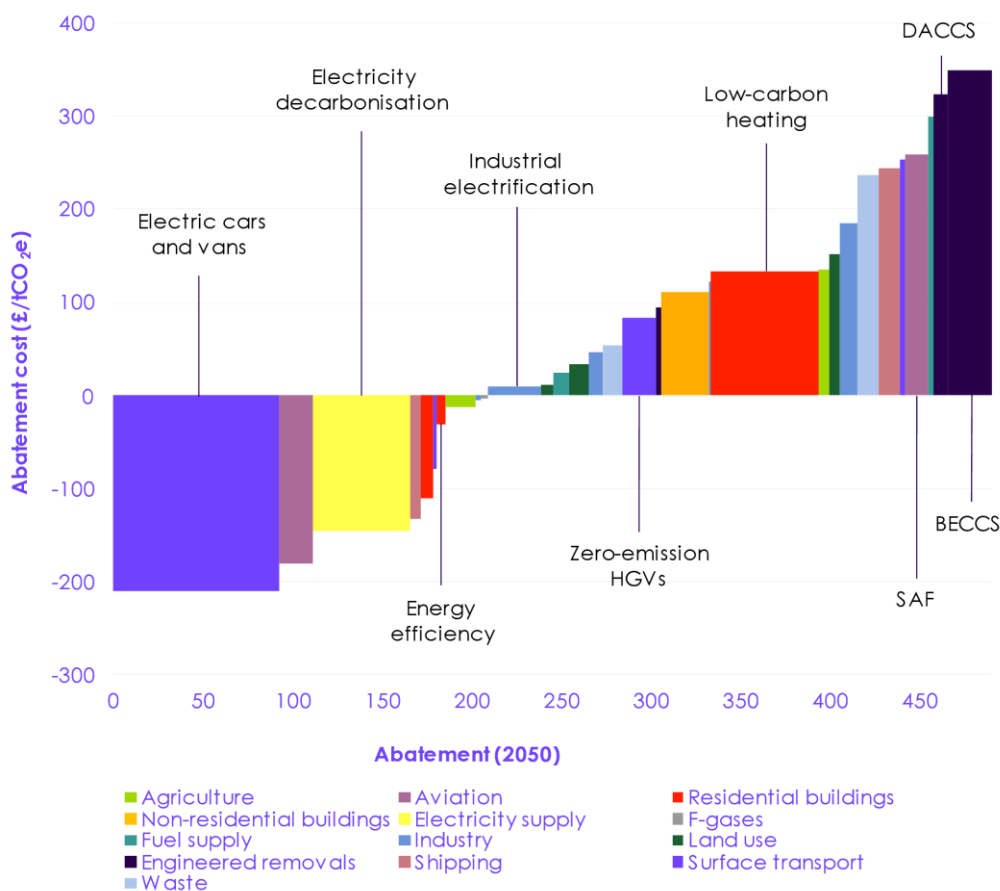
Les travaux menés au Royaume-Uni s'appuient sur des analyses détaillées des coûts et gisements d'abattement des différentes technologies de décarbonation. Le Climate Change Committee a ainsi estimé les coûts d'abattement des principales mesures sectorielles de décarbonation envisagées (telle que l'électrification des véhicules, la décarbonation des moyens de chauffage, les gains d'efficacité énergétique dans l'industrie ou la capture et le stockage de carbone) (voir Graphique 12)³. À horizon 2050, les mesures structurantes pour l'atteinte de la neutralité carbone seraient réalisables à des coûts d'abattements moyens inférieurs à 350 £/tCO₂, et seraient toutes coût-efficaces au regard de la valeur du carbone considérée en 2050 (409 £/tCO₂).

¹ Voir par exemple Chakravorty U., Magné B. et Moreaux M. (2006), « A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 30, p. 2875-2904 ; ou van der Ploeg F. (2021), « *Carbon pricing under uncertainty* », *International Tax and Public Finance*, vol. 28, juillet, p. 1122-1142.

² Gouvernement britannique (2021), « *Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation* », Policy Paper, septembre.

³ Climate Change Committee (2025), *The Seventh Carbon Budget: Advice for the UK Government*, février.

Graphique 12 – Coûts d’abattement moyens en 2050 pour le Royaume-Uni (en livres sterling 2023)



DACCS : *Direct Air Capture and Storage*. BECCS : bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone. Zero-emissions HGVs : poids-lourds zéro émissions.

Lecture : en 2050, un grand nombre d’actions sont rentables du point de vue des coûts d’abattement (véhicules électriques, décarbonation de l’électricité). Les autres actions présentes sur le graphique sont réalisables à coût d’abattement moyen positif, mais demeurent coût-efficaces en comparaisons à la valeur du carbone considérée en 2050 de 409 £/tCO₂.

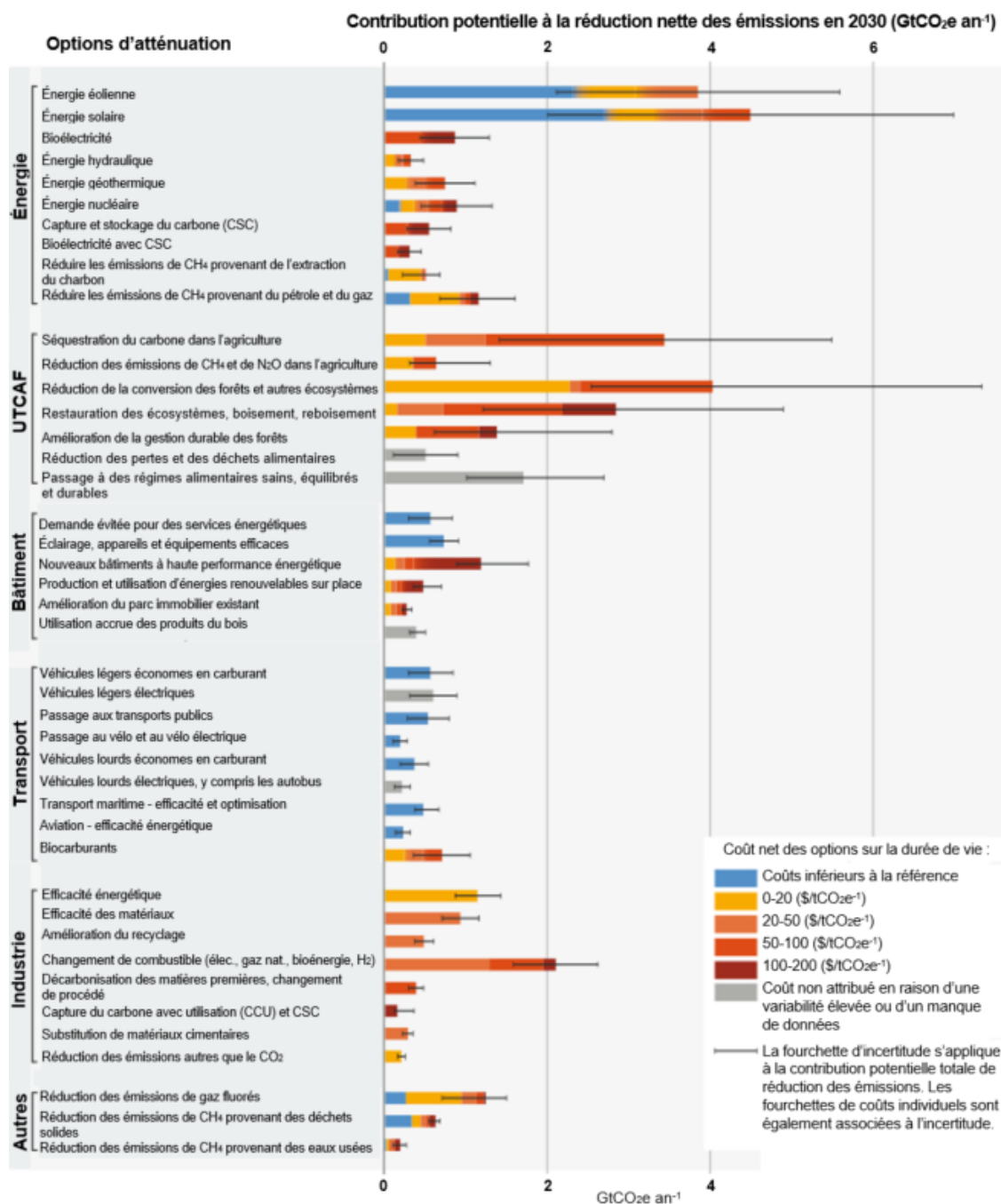
Source : *Climate Change Committee (2025), The Seventh Carbon Budget: Advice for the UK Government*, février, figure 4.6, p. 97

Ces ordres de grandeur sont cohérents avec ceux fournis par le GIEC à l’horizon 2030¹. Le GIEC estime en effet que de nombreuses options disponibles aujourd’hui dans tous les secteurs offrent un potentiel substantiel de réduction des émissions nettes d’ici à 2030 pour un coût à la tonne de CO₂e abattue de moins de 200 dollars (voir Graphique 13). Il note notamment que plusieurs d’entre elles, dont l’énergie solaire, l’énergie éolienne, l’électrification des systèmes urbains, l’infrastructure verte urbaine, l’efficacité énergétique,

¹ GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, op. cit., Summary for Policymakers.

l'amélioration de la gestion des forêts, des cultures et des prairies, et la réduction des déchets et des pertes alimentaires, sont techniquement viables.

Graphique 13 – Options d’actions d’atténuation et leurs coûts potentiels en 2030



Source : GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe III, avril, Summary for Policymakers, figure SPM.7, p. 38

2.6. Les coûts d'abattement sectoriels en France

En France, la commission sur les coûts d'abattement des émissions de GES, présidée par Patrick Criqui, a été installée en septembre 2019 dans le but d'identifier les principales options stratégiques, secteur par secteur, et d'en mesurer les coûts socioéconomiques¹. Les travaux de cette commission permettent de préciser quelques coûts d'abattement clés, dans les domaines notamment de l'énergie, des transports et de l'industrie. Les coûts d'abattement se définissent comme l'écart de coût actualisé entre une action de décarbonation et une action carbonée équivalente, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre évitées par l'action (voir section 1.2 du Chapitre 3).

- Le secteur électrique² peut être décarboné pour un coût d'abattement inférieur à 400 €/tCO₂. Ce coût d'abattement diminue légèrement en augmentant la part de nucléaire, mais apparaît globalement peu sensible à des variations de mix de production. En revanche, l'électrification des usages doit tenir compte de la hausse du coût complet de l'électricité³ induite par l'augmentation de sa consommation.
- Le développement de l'hydrogène⁴ est envisagé comme vecteur énergétique final bas carbone ou pour jouer un rôle de stockage de l'électricité et d'équilibrage du système électrique. L'option de production par le passage de l'hydrogène gris à l'hydrogène bleu, par capture et stockage du carbone (CSC) associée, pourrait s'opérer à des coûts modérés à l'horizon 2030-2040, de l'ordre de 100 €/tCO₂ pour les usages non énergétiques et 250 €/tCO₂ pour les usages énergétiques. La production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité décarbonée (dit « hydrogène vert ») présente en revanche des coûts d'abattement de l'ordre de 350-400 €/tCO₂ en usage non énergétique et de 600 €/tCO₂ en usage énergétique. La rentabilité socioéconomique de cette voie est néanmoins fortement tributaire de l'évolution du système électrique européen : en l'absence de système électrique suffisamment décarboné en Europe, le recours à l'électricité bas carbone demeure généralement plus efficient que l'hydrogène, pour les usages énergétiques.

¹ Tel que cela a été recommandé par la commission Quinet 2019. Pour l'ensemble des travaux de la commission Criqui, voir [sur le site de France Stratégie](#). Les enseignements de la commission Criqui font également l'objet d'un complément au rapport présent (voir [Annexe 4](#)).

² France Stratégie (2022), [Les coûts d'abattement. Partie 3 – Électricité](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, janvier.

³ D'après le rapport de la DG Trésor sur les enjeux économiques de la transition, ces coûts pourraient connaître une hausse de 15 à 70 % en 2050 par rapport à aujourd'hui. DG Trésor (2025), [Rapport intermédiaire. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone](#), op. cit.

⁴ France Stratégie (2022), [Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, mai.

- Dans le secteur des transports¹, le véhicule électrique urbain présente le coût d'abattement le plus faible (entre 200 et 270 €/tCO₂ en 2030, dans l'hypothèse favorable de baisse de coût du véhicule). Le véhicule hybride n'apparaît pas comme une option à retenir car il ne permet pas de répondre au niveau d'ambition des objectifs sectoriels à long terme. À l'horizon 2040, les coûts d'abattement sont plus faibles pour la berline électrique, entre 110 €/tCO₂ et 190 €/tCO₂ (dans l'hypothèse d'une poursuite des baisses de coût du véhicule). Toujours à cet horizon, le véhicule à hydrogène reste plus coûteux que le véhicule électrique.
- Dans le logement, l'évaluation des coûts se heurte à des difficultés tenant à la fois à la nature des actions (travaux d'isolation, changements de système de chauffage, part des changements de comportement, etc.) et à l'extrême diversité tant des conditions initiales du bâti que de la situation des acteurs impliqués. Les simulations montrent que la rénovation performante et l'électrification des passoires énergétiques et des logements chauffés au fioul sont réalisables pour des coûts d'abattement modérés.
- Dans le secteur du ciment², la solution du remplacement d'une partie du clinker par de l'argile calcinée, dont le potentiel est estimé à un quart ou un tiers des émissions du secteur du ciment, présente un coût d'abattement socioéconomique aujourd'hui relativement faible – entre 0 €/tCO₂ et 40 €/tCO₂. En complément, des technologies de capture et séquestration du carbone (CSC) paraissent susceptibles d'être déployées à grande échelle, si les infrastructures de transport et de stockage ainsi que l'accès aux gisements le permettent. À l'horizon 2030, les coûts de la CSC issue de la production de clinker passeraient de 140 €/tCO₂ à 210 €/tCO₂.
- Dans le secteur de l'acier³, la technologie de réduction directe au gaz naturel, déjà disponible et permettant une réduction d'environ 40 % des émissions de CO₂, pourrait remplacer les hauts-fourneaux actuels utilisant du charbon, pour un coût d'abattement situé entre 70 €/tCO₂ et 110 €/tCO₂ en 2030. Parmi les technologies disponibles à l'horizon 2030-2035, la réduction directe au gaz naturel avec ajout de la CSC ou l'électrodéposition sont les deux technologies dont les coûts d'abattement sont les plus faibles (entre 150 €/tCO₂ et 200 €/tCO₂).

¹ *Id.* (2021), [Les coûts d'abattement. Partie 2 – Transports](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, juin.

² *Id.* (2022), [Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, novembre.

³ *Id.* (2024), [Les coûts d'abattement. Partie 7 – Acier](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, octobre.



CHAPITRE 2

LA NOUVELLE TRAJECTOIRE DE LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

La modélisation de la lutte contre le changement climatique a beaucoup progressé depuis une dizaine d'années. La tâche est immense car il faut, pour disposer d'une vue complète des interactions entre climat, économie et technologies, faire converger une modélisation technique décrivant les solutions technologiques possibles pour atteindre l'objectif ZEN et une modélisation macroéconomique plus traditionnelle permettant de décrire les changements de politique et de comportements nécessaires.

Il n'existe pas d'outil de simulation « clés en main » générant mécaniquement une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat. La commission propose donc une estimation raisonnable, fruit d'une délibération collective fondée sur les grands enseignements de l'économie du climat, sur une revue des technologies de décarbonation disponibles ainsi que sur les travaux spécifiques de modélisation.

1. Les motifs de révision de la trajectoire : un changement de contexte par rapport à la précédente commission

La trajectoire de la valeur de l'action pour le climat doit bénéficier d'une certaine stabilité dans le temps. La modifier trop souvent, c'est prendre le risque de lui faire perdre sa valeur d'ancrage des anticipations publiques et privées. Cependant, trois éléments nouveaux intervenus invitent à réviser la trajectoire élaborée en 2019 :

- En premier lieu, le relèvement des objectifs 2030 de -40 % à -50 % d'émissions brutes (par rapport à 1990) et, dans une moindre mesure, la révision en baisse des potentiels de puits naturels, comme présenté au Chapitre 1 ;
- En second lieu, une mise à jour des perspectives économiques et technologiques. Les perspectives de prix des énergies fossiles prises en compte ont globalement évolué légèrement à la hausse entre les deux commissions – ce qui incite spontanément à substituer des énergies décarbonées aux énergies fossiles. Plus

fondamentalement, les travaux sous-jacents à la SNBC 3 montrent que l'on dispose aujourd'hui d'une vision plus précise du portefeuille des technologies bas-carbone mobilisables, même si des incertitudes importantes perdurent sur la fin de période ;

- En troisième lieu, le taux d'actualisation a été révisé à la baisse par le comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics de France Stratégie. Il s'établit désormais à 3,2 %, contre 4,5 % en 2019 (voir Encadré 5). Comme rappelé au Chapitre 1, ce taux joue un rôle crucial pour s'assurer d'une bonne répartition des efforts dans le temps.

Encadré 5 – Révision du taux d'actualisation socioéconomique

Le taux d'actualisation socioéconomique¹ a été révisé à la baisse, de 4,5 % à 3,2 %, par le comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique de France Stratégie en 2021. Ce nouveau taux est obtenu à partir de la formule $[1,2 \% + \beta 2 \%]$, où 1,2 % est le niveau du taux sans risque, 2 % celui de la prime de risque macroéconomique, avec un bêta socioéconomique égal à 1, représentatif d'un investissement « moyen » de l'économie (c'est-à-dire dont les avantages sont proportionnels au PIB par tête).

Dans le cas de la valeur de l'action pour le climat, l'hypothèse de bêta unitaire signifie une élasticité unitaire de la valeur de l'action pour le climat au PIB par tête – ou de manière équivalente une relation proportionnelle entre le coût marginal d'abattement et le PIB par tête. Cette hypothèse est empiriquement corroborée par l'une des rares études disponibles², des travaux complémentaires restant nécessaires pour confirmer ou affiner cette première estimation du bêta.

Il convient de souligner que le taux d'actualisation de la valeur de l'action pour le climat n'est pas le taux d'actualisation d'un projet de décarbonation spécifique : les gains de décarbonation dépendent non seulement de la valeur de l'action pour le climat mais aussi des émissions de CO₂ évitées, qui ont leur bêta propre. Un projet de ligne de transport collectif, par exemple, génère des gains carbone valorisés à la valeur de l'action pour le climat. Ces gains carbone sont à actualiser à un taux qui n'est pas le taux d'actualisation de la valeur de l'action pour le climat, mais ce taux rehaussé d'une prime de risque tenant compte du risque non diversifiable présent dans les quantités

¹ Le taux d'actualisation fait l'objet d'un complément au rapport (voir [Annexe 4](#)).

² Gollier C. (2024), « [The cost-efficiency carbon pricing puzzle](#) », *TSE Working Paper*, n° 952, Toulouse School of Economics, mai.

décarbonées et les bénéfices induits. Les gains carbone sont en effet corrélés au trafic, donc au PIB. Si le bêta de la valeur de l'action pour le climat et le bêta du trafic sont tous deux de 1, les gains carbone du projet sont à actualiser au taux de $1,2\% + 1 * 2\% + 1 * 2\% = 5,2\%$.

2. Les éléments de modélisation choisis pour éclairer les trajectoires possibles de la valeur de l'action pour le climat

Cette section présente les résultats de chacun des modèles, dont une description détaillée figure en [Annexe 5](#).

2.1. La mobilisation de modèles dédiés à l'analyse de la transition climatique

La commission a fait le choix de s'appuyer sur trois modèles complémentaires développés par les administrations en charge d'instruire la révision de la SNBC.

- Le modèle TiTAN est un modèle technico-économique du système énergétique français, développé par le Commissariat général au développement durable (CGDD) et cofinancé par le CGDD, France Stratégie et la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC). Il décrit la trajectoire la plus « coût-efficace » pour atteindre un objectif d'abattement donné. Cette approche s'affranchit de toute hypothèse sur les mesures de politiques publiques, présentes ou futures, pour se concentrer sur le coût des technologies bas-carbone à mobiliser pour atteindre la neutralité des émissions de GES.
- Le modèle ThreeME est un modèle macroéconomique multisectoriel, augmenté d'une modélisation technico-économique pour les décisions d'investissements résidentiels et d'achat de véhicules particuliers par les ménages. Issu d'une collaboration engagée en 2008 entre l'Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE) et l'Agence de la transition écologique (Ademe), et élargie depuis 2023 à la Direction générale du Trésor, ThreeME permet d'analyser les changements de comportement nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions.
- Le modèle Vulcain est un modèle macroéconomique stylisé visant à représenter de façon simplifiée les principaux mécanismes macroéconomiques relatifs à la transition énergétique sur le long terme. Sa valeur ajoutée réside dans sa capacité à rendre compte des incidences du contexte international sur l'action climatique européenne.

Ces modèles permettent de simuler une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat reflétant l'intensité des efforts à fournir, sans préjuger du choix des politiques publiques :

- dans le cas du modèle TiTAN, la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat correspond à la chronique du coût d'abattement du dernier levier technologique appelé pour satisfaire la contrainte d'émissions. Sa valeur est indépendante des instruments politiques ;
- dans le cas du modèle ThreeME et du modèle Vulcain, la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat est modélisée par la hausse du prix du carbone. Les recettes générées sont supposées être intégralement redistribuées, sous forme de transferts forfaitaires aux ménages et de baisse d'impôt sur les sociétés, au prorata de leurs émissions. Ce choix de modélisation ne préjuge pas des choix de politique économique et du bon mix des instruments de prix, de normes et de subventions.

Ces modèles prennent en compte une partie des coûts d'ajustement, c'est-à-dire des frictions qui tendent à freiner les investissements et les changements de comportement permettant de réduire les émissions de GES (voir Encadré 6). Ces coûts d'ajustement peuvent affecter les niveaux de la valeur de l'action pour le climat en début de période en renchérissant certaines actions de décarbonation ou créer un décalage dans le temps entre la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat et la trajectoire de réduction des émissions, en raison des délais incompressibles pour s'approvisionner, investir, recruter et former.

Encadré 6 – Les coûts d'ajustement et la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat

Les coûts d'ajustement prennent plusieurs formes, représentées de façon plus ou moins explicite selon les modèles.

Les coûts échoués

Ils représentent le coût de la mise au rebut anticipée d'actifs (le remplacement d'une chaudière au fioul par une pompe à chaleur est d'autant plus coûteux que la chaudière au fioul est récente). Ces coûts sont explicitement pris en compte dans TiTAN, qui intègre la valeur résiduelle des actifs dans ses arbitrages. L'analyse avec ThreeME n'en tient pas compte, mais il est possible de modéliser ce risque en appliquant de manière exogène une hausse de taux de dépréciation des actifs.

Les coûts de réorientation du progrès technique vers les technologies bas carbone

L'accumulation passée d'innovations et de savoir-faire sur les technologies carbonées confère à ces dernières une productivité marginale supérieure à celles des technologies moins émissives¹. En sens inverse, le déploiement de certaines technologies décarbonées peut aussi générer des externalités positives d'apprentissage (en diminuant leur coût futur).

Les effets de tensions sur l'offre à court terme

- *Sur le marché des biens et services* : une forte demande pour des biens bas-carbone peut générer des goulets d'étranglement si les filières peinent à ajuster leur production en conséquence.
- *Sur le marché du travail* : un accroissement important de la demande pour certaines catégories de main-d'œuvre et de compétences (dans la rénovation des logements, par exemple) peut se trouver confrontée à des pénuries dans la mesure où la capacité de réallocation des emplois est limitée à court terme.

Les coûts d'information

Il s'agit par exemple des coûts d'accès à l'information des ménages et des entreprises sur les solutions disponibles pour décarboner.

Les coûts organisationnels

Dans le cas de la rénovation des logements, par exemple, les freins à la décision collective dans les copropriétés, les problèmes d'incitation pour les propriétaires bailleurs, les difficultés d'accès au crédit par les ménages ou encore l'asymétrie d'information entre ménages et entreprises de rénovation² sont autant de freins à l'investissement et à l'efficacité des actions.

¹ Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hemous D. (2012), « [The environment and directed technical change](#) », *American Economic Review*, n° 102(1), p. 131-166.

² Voir France Stratégie (2022), [Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, novembre.

2.2. Un cadrage des scénarios cohérent avec la SNBC

La SNBC 3 comporte à la fois des objectifs de décarbonation et des trajectoires décrivant – sous un jeu d'hypothèses macroéconomiques raisonnables – comment ces objectifs peuvent être atteints.

Les objectifs de décarbonation

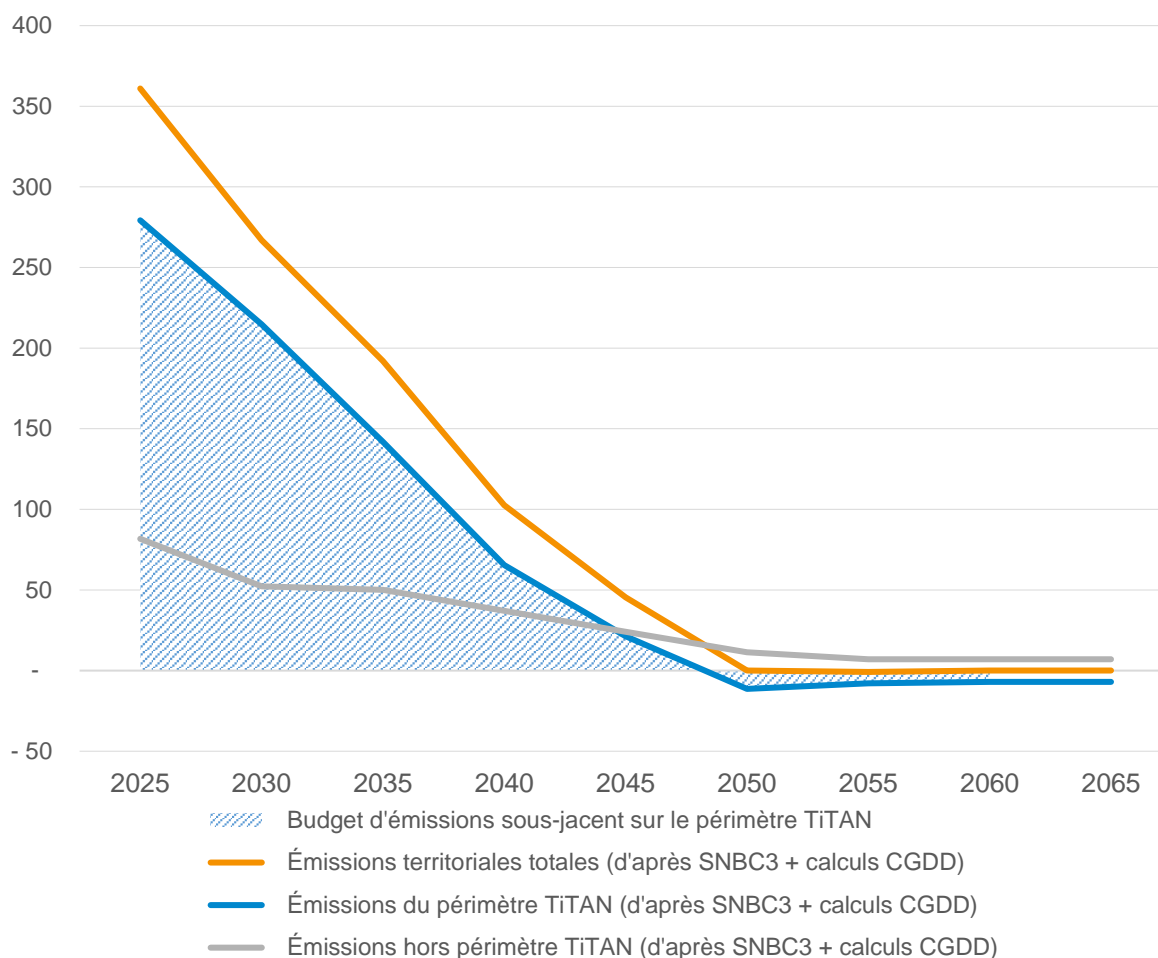
Les objectifs français de réduction des émissions ne s'expriment pas en quote-part de budget carbone mondial, mais en flux pluriannuels de réduction progressive des émissions jusqu'à l'atteinte de l'objectif ZEN. Dans ce contexte, la commission a testé deux types de simulations.

- Un premier jeu de simulations s'adosse scrupuleusement à la formulation des objectifs de la SNBC 3, comprenant un objectif intermédiaire en flux pour 2030 et une séquence de budgets quinquennaux 2024-2028, 2029-2033, 2034-2038, et destinés à atteindre la cible ZEN en 2050 (courbes du Graphique 14 page suivante). Dans un tel contexte, la répartition des efforts dans le temps est fixée *ex ante* et imposée aux modèles.
- On peut alternativement, à partir de cette trajectoire, calculer un budget carbone implicite correspondant à la somme des émissions restant à abattre d'aujourd'hui à 2050 (voir Graphique 6 du Chapitre 1 et Graphique 14 page suivante sur le périmètre du modèle TiTAN). Cette simulation alternative s'affranchit des jalons intermédiaires (2030, 2040) et identifie la forme que prendraient la répartition des efforts et la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat dans un monde où on ne se fixerait pas d'autres contraintes que celle de ne pas dépasser un plafond d'émissions. Le nouveau modèle TiTAN permet, pour la première fois depuis que les travaux sur la valeur de l'action pour le climat ont été lancés, de représenter et d'optimiser une telle contrainte en budget carbone.

Mener conjointement ces deux exercices permet de disposer d'une information plus riche sur les niveaux et les pentes possibles de la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat, ainsi que sur la répartition sous-jacente des efforts dans le temps :

- la première simulation en flux permet d'identifier la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat qu'implique le strict respect des jalons intermédiaires que se sont donnés l'Europe et la France ;
- la seconde simulation en budget carbone permet d'identifier une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat « libérée » des contraintes calendaires et de donner une vue plus normative de la bonne répartition des efforts dans le temps.

Graphique 14 – Trajectoire de réduction des émissions et budget sous-jacent dans le modèle TiTAN (en MtCO_{2e})



Note : les contraintes d'émissions sont définies sur les émissions tous GES confondus et sont exprimées en tCO_{2e} en utilisant les PRG100 indiqués dans le 6^e rapport du GIEC. Calculer des budgets d'émissions tous GES confondus en « carbone équivalent » n'est pas parfaitement rigoureux du point de vue de la climatologie. Cependant les méthodes alternatives ne font pas encore consensus¹. De plus, la part des émissions de GES hors CO₂ est faible dans le périmètre du modèle TiTAN. On se permet donc cette approximation.

Lecture : les séries 1, 2 et 3 correspondent au scénario AMS run 2 de la SNBC 3 jusqu'en 2035, puis à des calculs de la commission après 2035, le scénario AMS n'étant pas complètement stabilisé à la date de production des simulations. Le budget d'émissions (série 4) est calculé en cumulant les valeurs de la série 2, de l'ordre de 2 940 MtCO_{2e} de 2025 à 2050. La contrainte carbone appliquée au modèle TiTAN peut être soit une contrainte de flux correspondant à la série 2 (scénario « TiTAN-flux »), soit la combinaison d'un budget carbone de 2025 à 2060 (série 4) et d'une contrainte de flux terminal compatible avec ZEN (scénario « TiTAN-budget »).

Source : DGEC, simulations du scénario AMS (run2) en préparation de la SNBC3 jusqu'en 2035, calculs CGDD pour le post-2035

¹ GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Technical Summary*, avril, p. 63.

Le contexte macroéconomique des simulations

Les simulations réalisées retiennent des hypothèses macroéconomiques cohérentes avec le cadrage de la SNBC 3. Elles sont résumées dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 – Hypothèses macroéconomiques structurantes

Variables macroéconomiques	Hypothèses
Évolution de la population	69 millions d'habitants en 2050 en France métropolitaine (selon le scénario central de projection de population de l'Insee)
Croissance tendancielle du PIB	+1,25 % par an en moyenne sur la période 2024-2050 (scénario de la Commission européenne, ajusté de la croissance de population selon l'Insee*)
Prix des énergies	<p>Les prix des énergies croissent au taux de +1,3 % par an en moyenne sur la période 2020-2050, aboutissant selon le vecteur énergétique aux prix suivants (scénario de la Commission européenne) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pétrole : croissance jusqu'à environ 70 €₂₀₂₃/MWh en 2050 • Gaz naturel : stabilisation autour de 40 €₂₀₂₃/MWh à partir de 2030 (-10 % entre 2025 et 2030) • Électricité : ThreeME 195 €₂₀₁₉/MWh en 2050 (soit 220 €₂₀₂₃/MWh) <p>TITAN : le prix des énergies finales (dont électricité) est endogène.</p>

* Les prévisions de croissance de la Commission européenne s'appuient sur des hypothèses de croissance démographique différentes des projections de l'Insee. Ces prévisions sont donc ajustées pour garantir la cohérence avec les hypothèses de projection de population retenues.

Source : commission

Les hypothèses sur le contexte international

Dans le modèle Vulcain, l'Union européenne est supposée suivre la même trajectoire de décarbonation que la France avec les mêmes niveaux relatifs de réduction, tandis que le reste du monde met en œuvre les *Nationally Determined Contributions* (NDC) pour 2050, c'est-à-dire approximativement une division par deux de ses émissions sur la période.

Les leviers de décarbonation de l'économie : sobriété et technologies bas carbone

La trajectoire se fonde sur un jeu d'hypothèses raisonnables concernant les leviers de décarbonation mobilisables en matière de sobriété et de technologie.

Le rôle de la sobriété

La sobriété recouvre en pratique un ensemble assez large d'actions, comme rappelé dans l'Encadré 7. Dans les simulations, elle est pour l'essentiel prise en compte *ex ante* via des hypothèses exogènes sur la demande. Elle permet, dans les scénarios de la SNBC 3, d'accomplir environ 20 % du chemin à l'horizon 2050.

Encadré 7 – Sobriété individuelle et collective

À l'origine peu présente dans le débat public en dehors des périodes de crises énergétiques (des chocs pétroliers à l'invasion de l'Ukraine), la sobriété s'est progressivement imposée comme un élément central des politiques environnementales. Le GIEC¹ en propose la définition suivante :

« Les politiques de sobriété sont un ensemble de mesures et de pratiques quotidiennes qui évitent la demande en énergie, matières, sols et eau, tout en assurant le bien-être humain pour tous au sein des limites planétaires. »

Le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023)² de France Stratégie retient une définition plus ciblée :

« La sobriété peut être définie comme la réduction de la demande d'énergie qui ne résulte pas de gains d'efficacité énergétique. Elle peut provenir à la fois de choix individuels (baisser la température de son logement), de normes collectives (ne plus prendre aussi souvent l'avion, manger moins de viande) ou de principes d'organisation collective (mieux organiser la ville et les transports du quotidien) ».

Cette dernière définition est désormais assez usuelle : elle est partagée par exemple par l'association négaWatt et le rapport *Transition(s) 2050* de l'Ademe. C'est celle qui est considérée dans le présent rapport. La sobriété est vue comme le complémentaire de l'efficacité énergétique pour la réduction de la demande. Celle-ci se définit comme une « réduction de la consommation d'énergie sans modifier le service rendu. L'efficacité n'est donc pas le résultat d'un changement de comportement mais d'un changement d'équipement vers une solution moins énergivore, par exemple à la suite d'un progrès technologique³ » : l'isolation des bâtiments, impliquant une diminution de la consommation de chauffage à confort thermique inchangé, en est un exemple.

¹ Traduit de GIEC (2022), [Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers](#), avril.

² France Stratégie (2023), [Les incidences économiques de l'action pour le climat. Sobriété](#), rapport thématique coordonné par Aude Pommeret, mai.

³ *Ibid.*, p. 8.

La sobriété est estimée avoir un potentiel important de réduction de la demande énergétique, et donc des émissions de gaz à effet de serre (jusqu'à 30 % des émissions des secteurs aval selon le GIEC). De plus, sa capacité estimée à réduire les coûts de la transition, à réaliser des co-bénéfices (biodiversité, santé, etc.) et à réduire les dépendances à l'environnement international en fait pour de nombreux acteurs un levier à prioriser. Cependant, les changements importants de modes de vie qu'une sobriété ambitieuse implique ne se réaliseront pas sans action publique soutenue, ainsi que le souligne le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023)¹ :

« La sobriété n'est pas spontanée : elle résulte au contraire de mesures plus ou moins affirmées de politique publique. Cela peut prendre la forme d'informations sur les conséquences individuelles et collectives des modes de consommation (communication, éducation), de petites impulsions pour orienter les choix (*nudges*) ou de politiques publiques standards (taxes, subventions, réglementations). »

Deux éléments importants doivent être soulignés pour apprécier l'impact macroéconomique de la sobriété.

En termes financiers, certaines actions de sobriété impliquent des coûts de décarbonation : c'est le cas des actions visant par exemple à réduire la demande de transports individuels par le développement des transports collectifs et du vélo.

En termes de bien-être, des comportements de sobriété peuvent se matérialiser à partir de préférences des individus inchangées (et pourront donc s'accompagner de pertes de bien-être, telles que par exemple la réduction du chauffage dans les bâtiments) ou via des changements de préférences.

Dans le cas de TiTAN, la demande dépend de nombreux paramètres : population, parts modales², demande annuelle de transport par personne, température de consigne de chauffage, part de recyclage dans les produits manufacturés, etc. On désigne alors par « hypothèses de sobriété » les évolutions de ces paramètres par rapport à leur valeur tendancielle. Dans le scénario central de TiTAN, les hypothèses de sobriété sont cohérentes avec celles de l'AMS de la SNBC 3 et contribuent à réduire la demande en services énergétiques dans tous les secteurs aval (voir Tableau 10 et Graphique 15 pages suivantes). Ce choix évite de « surcharger » le besoin d'investissement nécessaire pour atteindre ZEN.

¹ *Ibid.*, p. 5.

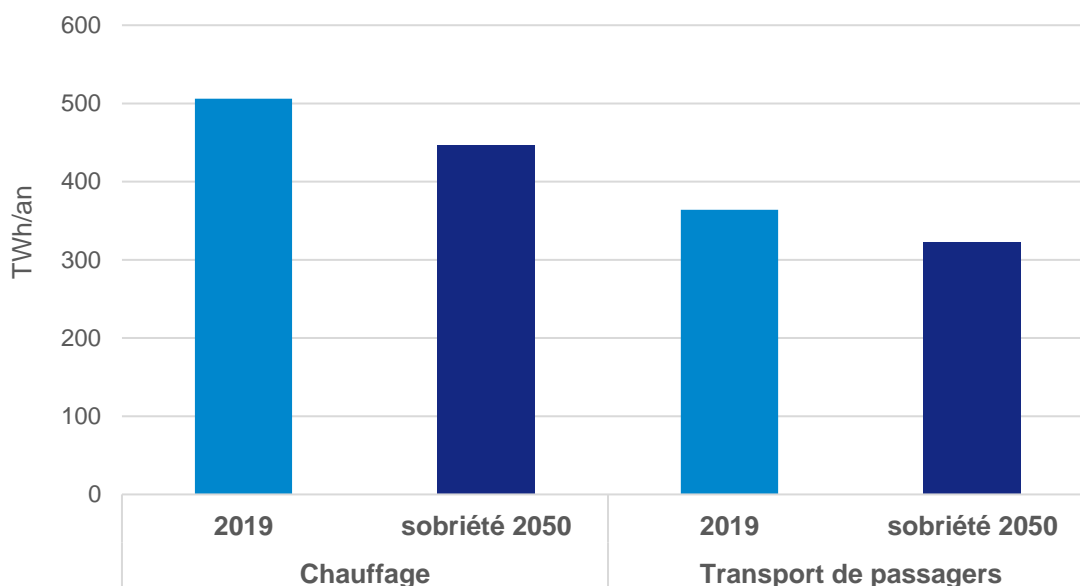
² Les modes sont : l'habitat individuel et l'habitat collectif pour le secteur résidentiel ; les différents modes de transport pour le secteur transport ; les différents procédés industriels disponibles pour une même filière dans le secteur industrie, etc.

**Tableau 10 – Exemples d'hypothèses de sobriété
intégrées dans les simulations de TiTAN**

Secteur	Usage	Paramètre	Variation 2050 sans hypothèses de sobriété	Variation 2050 avec hypothèses de sobriété	Action publique justifiant l'évolution	
Bâtiment	Chauffage	Température de consigne de chauffage hiver	18,9 °C	+ 0 °C	- 0,4 °C	Campagnes d'information
	Eau chaude sanitaire (ECS)	Besoin d'ECS par personne et par an en maisons individuelles	361 kWh/an/personne	-6 %	- 26 %	Campagnes d'information
Transport	Passagers	Taux de remplissage des véhicules particuliers	1,62 passager/trajet	+ 0 %	+ 11 %	Mesures de soutien au covoiturage et à l'autopartage
		Part modale du train dans les trajets longue distance	17,6 %	+ 3,2 p.p.	+ 8,1 p.p.	Extension du réseau, politique tarifaire, campagnes d'information
Industrie	Sidérurgie	Taux d'incorporation de matières premières recyclées	42 %	+ 7 p.p.	+ 18 p.p.	Mesures réglementaires
	Papiers-cartons	Consommation intérieure	8,7 Mt/an	+ 38 %	+ 20 %	Mesures réglementaires sur les emballages, campagnes d'information

Source : DGEC

Graphique 15 – Réduction de la demande en énergie finale par les hypothèses de sobriété dans TiTAN



Lecture : les hypothèses de sobriété sur la demande d'ici à 2050 réduisent la demande d'énergie finale pour le chauffage de 53 TWh par rapport à 2019 (à parc technologique identique, celui de 2019).

Source : calculs CGDD sur la base des hypothèses du projet de SNBC 3 et prolongées jusqu'en 2050

Les hypothèses exogènes de sobriété prises en compte dans ThreeME reposent pour leur part sur le scénario AME de la SNBC 3. Ce choix est cohérent avec la structure du modèle, qui permet de simuler la hausse du prix du carbone nécessaire, au-delà des mesures déjà acquises pour atteindre les objectifs fixés.

Des hypothèses technologiques propres aux modèles

Dans les modèles, l'offre peut être représentée soit à partir de paniers technologiques disponibles à différents horizons de temps (pour les modèles technico-économiques comme TiTAN), soit à partir des capacités de substitution et de gains d'efficacité énergétique fondés sur une explicitation plus agrégée des technologies (dans les modèles macroéconomiques hybrides comme ThreeME).

Les hypothèses technologiques du modèle TiTAN sont tirées de la base de données du modèle JRC-EU-TIMES¹ (COM) pour les secteurs du bâtiment, de l'industrie, du transport et de l'énergie hors électricité. Certaines données ont été ajustées lorsque les hypothèses paraissaient obsolètes ou ajoutées, dans le cas de technologies absentes, sur la base de la littérature technico-économique existante. Les valeurs des paramètres technologiques du

¹ <https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/id-00287>

secteur de production d'électricité, à la fois pour le calage du point historique (capacités et production) et pour les montants des CAPEX et OPEX, reposent sur des données de RTE.

Dans ThreeME, le développement et le déploiement de nouvelles technologies¹ sont modélisés par le biais de deux canaux :

- l'augmentation du prix de l'énergie, induite par le renchérissement du prix du carbone. Celle-ci incite les entreprises à réaliser des gains d'efficacité énergétique selon un paramètre croissant dans le temps² ;
- les élasticités de substitution entre énergies carbonées et décarbonées. Celles-ci augmentent progressivement dans le temps, de sorte qu'à hausse du prix du carbone donnée, les ménages et les entreprises réduisent davantage leur consommation d'énergies fossiles au profit d'énergies décarbonées³.

Dans Vulcain, la disponibilité croissante dans le temps des technologies de décarbonation est traduite par un progrès technique exogène sur la productivité des facteurs de production, notamment dans le secteur des énergies renouvelables⁴ et deux élasticités de substitution, l'une entre les biens « verts » et les biens « bruns », l'autre entre les différents modes de production d'électricité⁵.

¹ Par exemple, augmentation de la capacité du nucléaire d'ici 2050, stockage géologique de carbone, avion à hydrogène à partir de 2040, biomasse, etc.

² 0 initialement, 0,3 en 2030, 1 en 2040. Ainsi, une augmentation du prix de l'énergie de 1 % conduit les entreprises à réaliser 0,3 % (en 2030) et 1 % (en 2040) de gains d'efficacité énergétique. Voir Ley M., Stucki T. et Woerter M. (2016), « The impact of energy prices on green innovation », *The Energy Journal*, vol. 37(1), p. 41-76 ; Dussaux D. (2020), *The joint effects of energy prices and carbon taxes on environmental and economic performance: Evidence from the French manufacturing sector*, OECD Environment Working Papers, n°154 ; et Fontagné L., Martin P. et Orefice G. (2023), *The Many Channels of Firm's Adjustment to Energy Shocks: Evidence from France*, Banque de France, Document de travail n° 929.

³ De 0,8 à 1,5 en 2030, 3 en 2040, 6 en 2050. Le niveau atteint en 2050 est la valeur moyenne retenue pour le modèle d'équilibre général dynamique et stochastique E-QUEST, développé pour évaluer les implications macroéconomiques des politiques de décarbonation. Pour une revue de littérature des définitions et des estimations économétriques des élasticités de substitution entre différents types d'énergies, voir Bouillot M., Girard P.-L. et Tokay N. (2024), *Présentation du module Mésange vert*, Direction générale du Trésor, Document de travail n° 2024/4. Pour une présentation du modèle E-QUEST, voir Veld J., Roeger W. et Varga J. (2021), *E-QUEST - A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy: Model Description and Applications to Reach the EU Climate Targets*, Commission européenne, Discussion Paper n° 146.

⁴ Ces taux de progrès technique exogène sur les facteurs de production sont calibrés sur la base de Henriët F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), « A stylized applied energy-economy model for France », *The Energy Journal*, vol. 35(4), p. 1-38, à savoir 1,6 % par an pour le travail et 2 % pour les énergies.

⁵ Ces élasticités sont calibrées de base à des valeurs de respectivement 3 et 2, d'après Papageorgiou C., Saam M. et Schulte P. (2017), « Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 99(2), p. 281-290.

3. Résultats des simulations selon les deux approches « flux » et « budget carbone »

La commission a réalisé deux types de simulations : la première fondée sur le strict respect de la trajectoire de réduction des émissions de la SNBC 3 (simulation dite « en flux ») et la seconde sur l'optimisation d'un budget carbone constitué par la somme des émissions à abattre d'ici 2050) (simulation dite en « budget »).

3.1. Les simulations en flux

Les simulations « en flux » sont strictement calées sur les trajectoires pluriannuelles de la SNBC 3 de 2025 à 2050, même si la trajectoire n'a pas le même niveau d'affermissement au-delà de 2033. Réalisées par trois modèles différents, ces simulations font ressortir les conclusions suivantes :

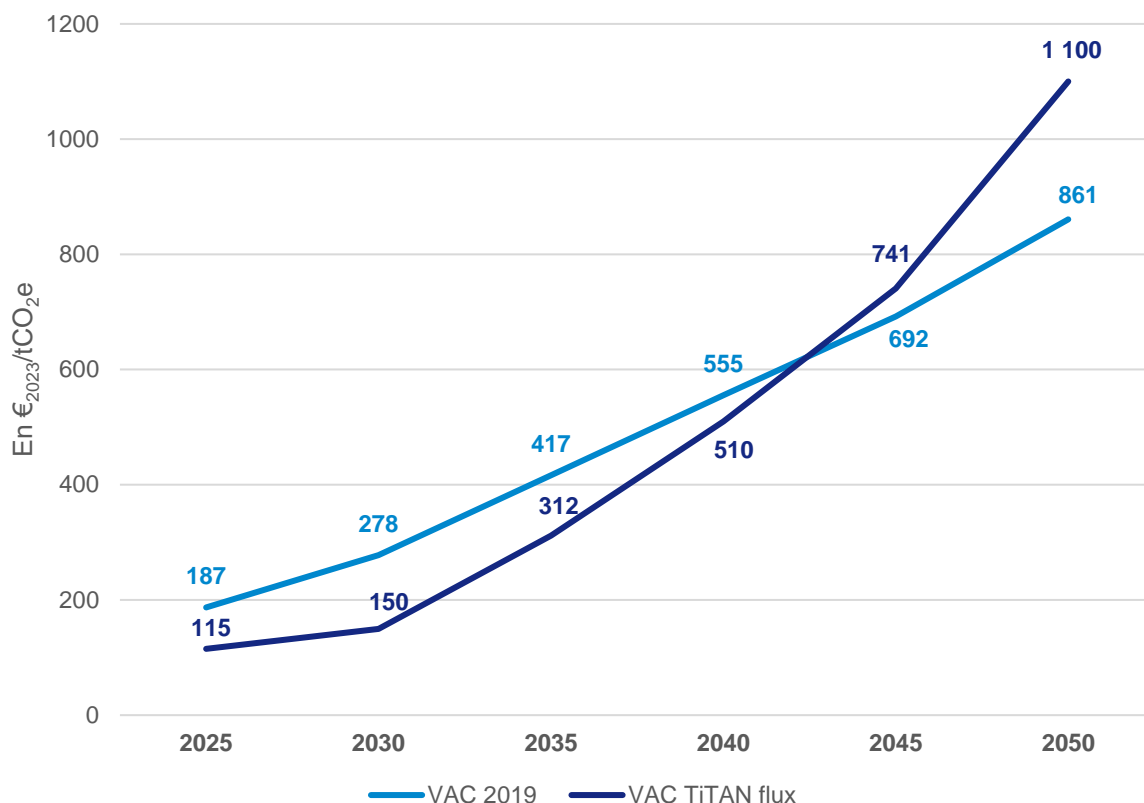
- une tendance à la revalorisation du point de départ dans ThreeME, le modèle sans doute le mieux calibré pour décrire les dynamiques de court terme et les coûts d'ajustement de la transition énergétique ;
- des valeurs 2030 dont la borne haute rejoint celle issue de la trajectoire 2019 (250 €₂₀₁₈, soit 278 €₂₀₂₃) ;
- des trajectoires de la valeur de l'action pour le climat croissantes dans le temps, à un rythme supérieur au taux d'actualisation socioéconomique de 3,2 % ;
- des valeurs très élevées à l'approche de l'horizon 2050 et de la neutralité carbone reflétant directement la forte convexité des coûts d'abattement, y compris dans le cas de la simulation TiTAN – modèle le plus à même de décrire les dynamiques de long terme. Les valeurs considérables atteintes par les modèles macroéconomiques ThreeME et Vulcain, peu armés pour représenter de tels chocs structurels à long terme, semblent quant à elles peu réalistes.

Les résultats du modèle TiTAN

Sur la base des trajectoires de réduction des émissions et des hypothèses décrites précédemment, cohérentes avec les objectifs et le scénario AMS de la SNBC 3, le modèle TiTAN aboutit à (voir Graphique 16) :

- une trajectoire croissante jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone ;
- une accélération à l'atteinte de la neutralité : ménages et entreprises doivent fournir un effort croissant dans le temps pour remplacer les dernières unités de capital polluant, plus coûteuses à abattre.

Graphique 16 – Trajectoire de la valeur du carbone fondée sur les engagements de réduction des émissions selon TiTAN

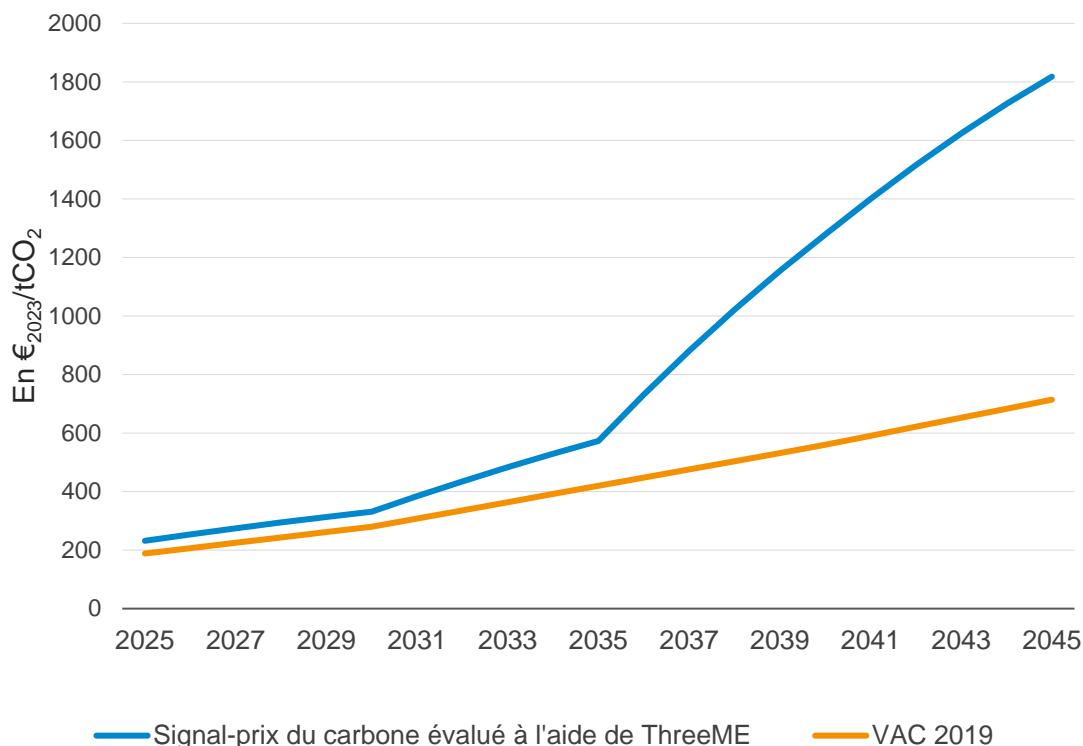


Source : CGDD, modèle TiTAN

Les résultats du modèle ThreeME

Les valeurs obtenues avec ThreeME sont dès le début de période supérieures à la valeur de la valeur de l'action pour le climat de la précédente commission, en raison du renforcement des objectifs de décarbonation, dans un contexte où les coûts d'ajustement modélisés sont importants (voir Graphique 17). Après une hausse progressive de la valeur de l'action pour le climat entre 2025 et 2030, l'augmentation s'accélère en 2035 jusqu'à 2045. Il n'a pas été possible d'évaluer un signal-prix du carbone cohérent avec les cibles d'émissions au-delà de cette date.

Graphique 17 – Trajectoire de la valeur du carbone fondée sur les engagements de réduction des émissions selon ThreeME



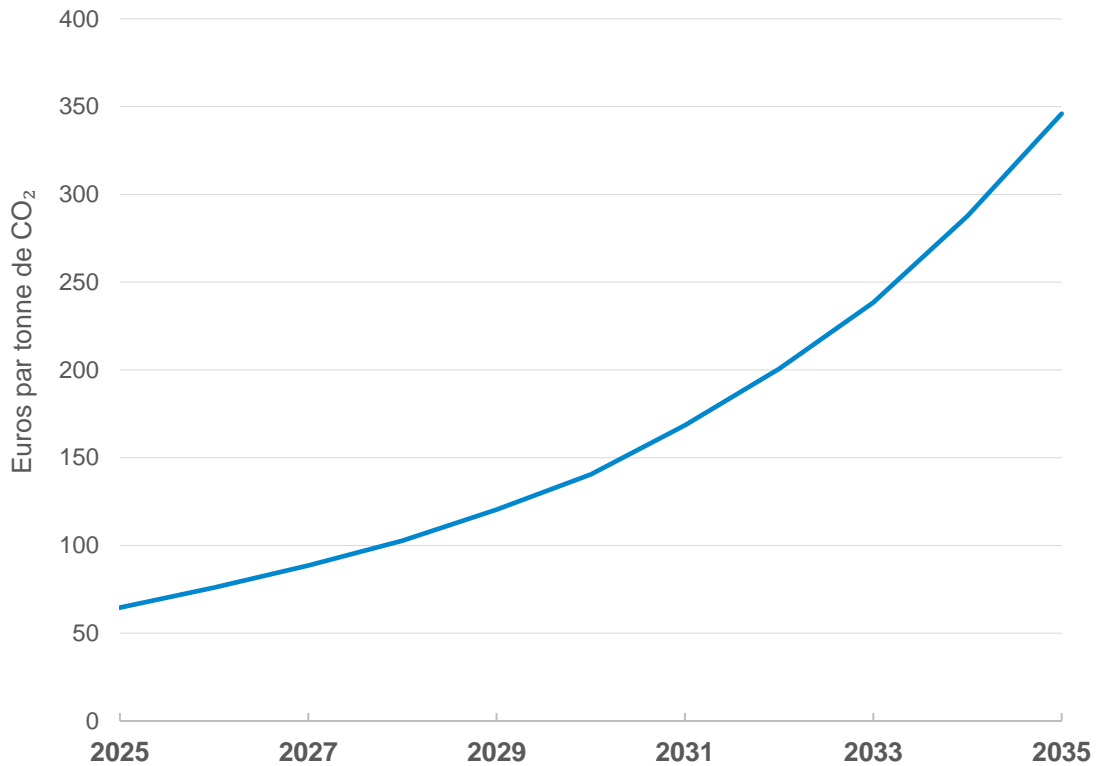
Note : le signal-prix du carbone est évalué en cohérence avec la trajectoire de réduction des émissions établie pour la SNBC 3, dans une approche en flux, ajustée au périmètre d'émissions couvert par le modèle ThreeME. Il est également fait l'hypothèse que les recettes implicites sont entièrement redistribuées aux ménages et aux entreprises sous forme de transferts forfaitaires.

Source : ThreeME ; calculs Direction générale du Trésor

Les résultats du modèle Vulcain

Dans le scénario central de Vulcain, la valeur de l'action pour le climat suit une trajectoire convexe, démarrant à un niveau faible, inférieur à la valeur de l'action pour le climat issue de la trajectoire de 2019 (voir Graphique 18). Cette forte convexité traduit la difficulté croissante à abattre les émissions à mesure qu'on approche de la neutralité carbone, mais elle s'explique aussi par des élasticités de substitution constantes – conservatrices donc – et par une représentation fruste du progrès technique.

Graphique 18 – Valeur du carbone dans le scénario central de 2025 à 2035, à partir du modèle Vulcain



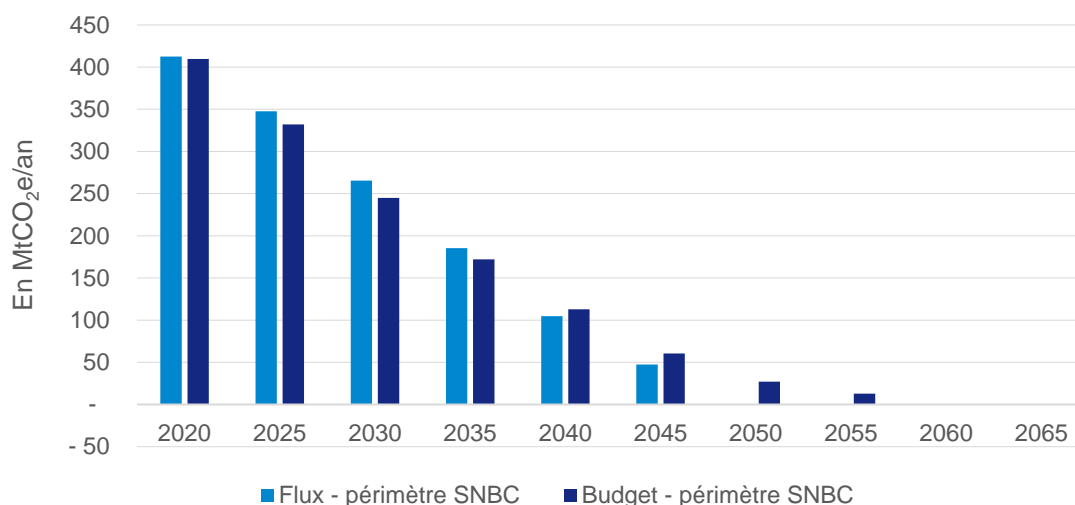
Note : VAC exprimée en euros 2023.

Source : CGDD, modèle Vulcain

3.2. Les simulations en budget carbone

Seul TiTAN permet de simuler l'optimisation d'un budget carbone – équivalent au niveau des émissions cumulées résultant de la trajectoire de réduction imposée dans les simulations précédentes (voir Graphique 19).

Graphique 19 – Trajectoire de réduction des émissions dans l'approche budget en comparaison de l'approche flux, selon les simulations de TiTAN



Note : le graphique représente les niveaux d'émissions aux différentes dates i) dans le scénario où la trajectoire d'émissions est imposée comme contrainte (en bleu clair, simulation en flux) et ii) dans le scénario où la contrainte est exprimée en budget (en bleu foncé). Dans ce dernier scénario, ces niveaux d'émissions résultent de l'optimisation de la consommation du budget par TiTAN et d'une contrainte de flux terminal assurant la neutralité nette des émissions. Les niveaux d'émissions sont réajustés au périmètre total d'émissions pris en compte dans la SNBC. La trajectoire de réduction de la SNBC n'étant pas encore complètement établie, la trajectoire d'émissions post-2035 de la simulation avec contrainte en flux correspond à une interpolation entre le point 2035 actuellement retenu dans le projet de SNBC et la neutralité en 2050.

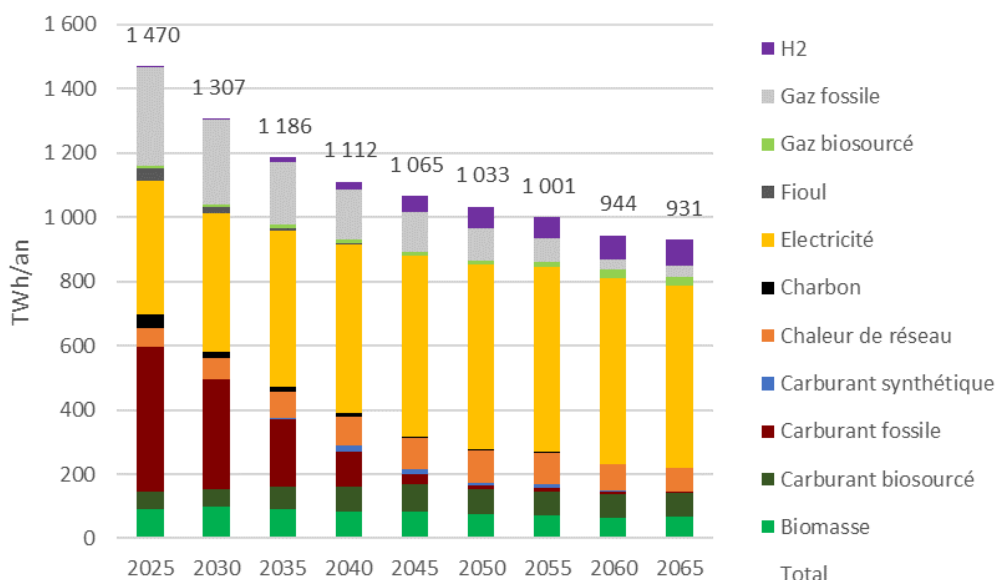
Source : CGDD, modèle TiTAN

TiTAN représente de façon détaillée les technologies composant le système énergétique. La valeur de l'action pour le climat qu'il simule correspond au coût marginal d'abattement de ce système, c'est-à-dire au coût d'abattement du levier mobilisé « à la marge ». Du fait du caractère intégré de la modélisation, ce levier ne correspond en général pas au déploiement d'une technologie particulière, mais plutôt à un ajustement simultané de plusieurs technologies dans tous les secteurs (voir Encadré 8 *infra*) :

- La substitution quasi complète des énergies fossiles constitue pour TiTAN un levier essentiel à l'atteinte de la neutralité carbone. Cette substitution est principalement réalisée par l'électricité, mais aussi par la biomasse et l'hydrogène renouvelable. Elle est complète dans le résidentiel et les transports terrestres, quasi complète dans le tertiaire et l'industrie. Le potentiel des technologies de décarbonation dans la production d'énergie a été plafonné d'après les scénarios de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).
- L'efficacité énergétique et la sobriété participent aussi de façon importante à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions, sur la base des hypothèses de la SNBC 3.

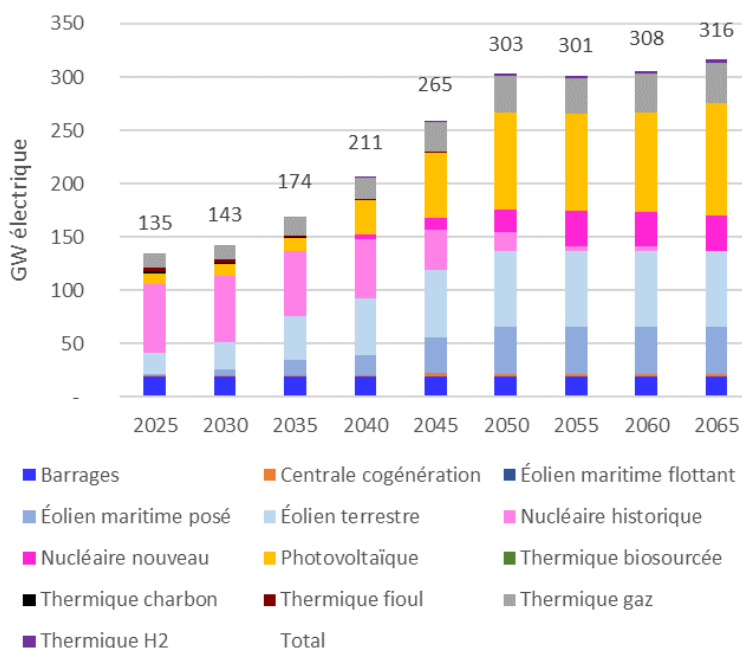
Le Graphique 20 ci-dessous décrit l'évolution de la consommation d'énergie finale dans l'approche budget. Le Graphique 21 représente l'évolution de la capacité de production électrique.

Graphique 20 – Consommation d'énergie finale dans « TiTAN-budget »



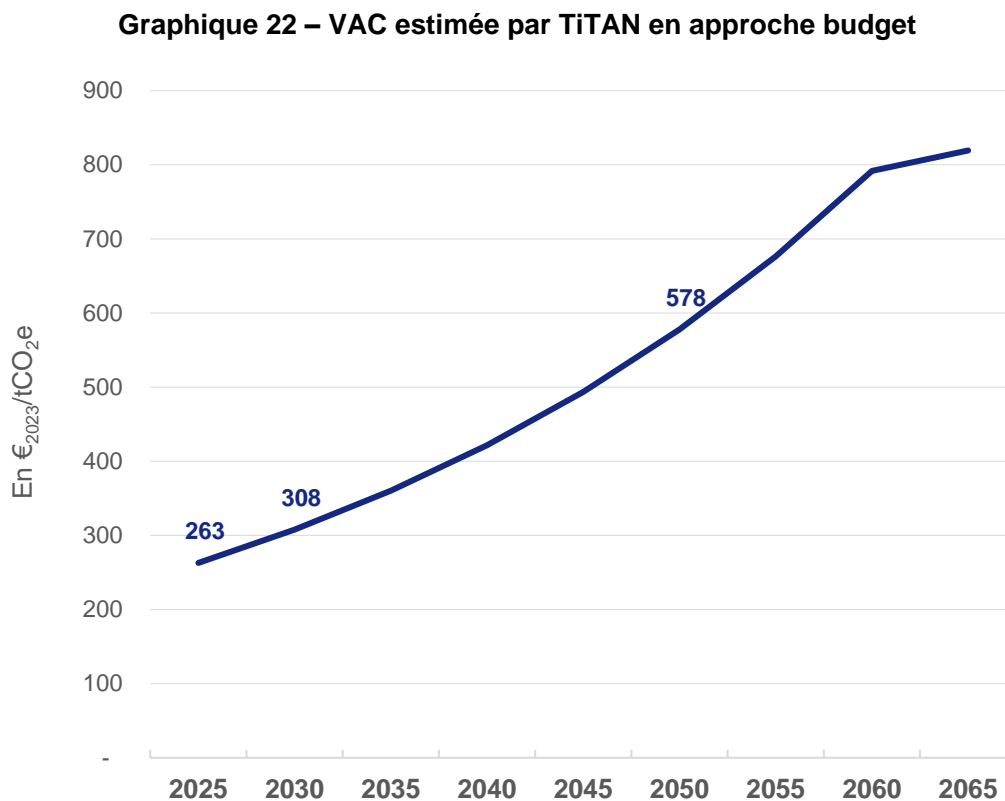
Source : CGDD, modèle TiTAN

Graphique 21 – Capacités de production électrique dans « TiTAN-budget »



Source : CGDD, modèle TiTAN

La trajectoire obtenue sous les hypothèses centrales de cadrage de la SNBC 3 (voir Graphique 22) croît, comme attendu, au rythme du taux d'actualisation en partant d'un niveau initial d'environ 260€₂₀₂₃/tCO_{2e} en 2025 pour atteindre près de 580€₂₀₂₃/tCO_{2e} en 2050.



Source : CGDD, modèle TiTAN

- La valeur de l'action pour le climat de début de période est plus élevée dans la simulation en budget carbone que dans la simulation en flux du même modèle, avec en sous-jacent des efforts plus importants en début de période.
- Cette simulation conduit, sous les hypothèses du modèle, à atteindre l'objectif de la neutralité carbone à 95 % en 2050, les ultimes émissions, les plus difficiles à abattre, l'étant dans les années qui suivent. Les émissions résiduelles de 2050, en partie exogènes au modèle, pourraient être annulées sous des hypothèses technologiques un peu plus favorables (de dimensionnement des puits notamment). Il faut cependant assumer que les incertitudes technologiques restent fortes à cet horizon.

Encadré 8 – Comparaison du sous-jacent technologique des scénarios TiTAN et ThreeME avec le scénario Net Zero by 2050 de l'AIE

Dans ses publications phares *World Energy Outlook* et *Energy Technology Perspectives*, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) explore trois scénarios, dont le *Net Zero Emissions by 2050*, un scénario normatif décrivant les modalités d'atteinte de la neutralité carbone mondiale en 2050. Cet exercice de prospective fait référence sur le portefeuille de technologies à mobiliser pour atteindre la neutralité carbone.

Malgré des différences de périmètre (voir Tableau 11), les comparaisons avec les scénarios TiTAN et ThreeME permettent de vérifier la cohérence des grandes orientations technologiques.

Tableau 11 – Comparaison des méthodologies des scénarios ZEN 2050, AMS et TiTAN et ThreeME

	Scénario ZEN 2050 de l'AIE (2023)	Scénario AMS de la SNBC 3	Scénario TiTAN	Scénario ThreeME
Périmètre géographique et résolution spatiale	Monde entier, désagrégation par région du monde	France entière, désagrégation métropole/DOM	France métropolitaine	France entière
Objectifs normatifs	Neutralité des émissions en 2050 pour le monde entier, avant 2050 pour les économies avancées dont la France ET Accès universel à l'énergie en 2030 ; Amélioration de la qualité de l'air	Neutralité des émissions en 2050 ET Plusieurs objectifs divers (consommation d'énergie primaire, usage des sols, décence des logements, etc.)	Neutralité des émissions en 2050	Neutralité des émissions en 2050
Périmètre de l'objectif de neutralité	CO ₂ uniquement, système énergétique seul (hors UTCATF)	Tous GES et tous secteurs (dont UTCATF)	Tous GES et tous secteurs (dont UTCATF)	CO ₂ uniquement, système énergétique et processus industriel (hors UTCATF)
Approche de scénarisation	Mixte, entre optimisation technico-économique sous contrainte, simulation et dire d'expert	Simulations secteur par secteur et mise en cohérence itérative	Optimisation technico-économique sous contrainte d'émissions	Simulation macroéconomique

Source : CGDD et DG Trésor

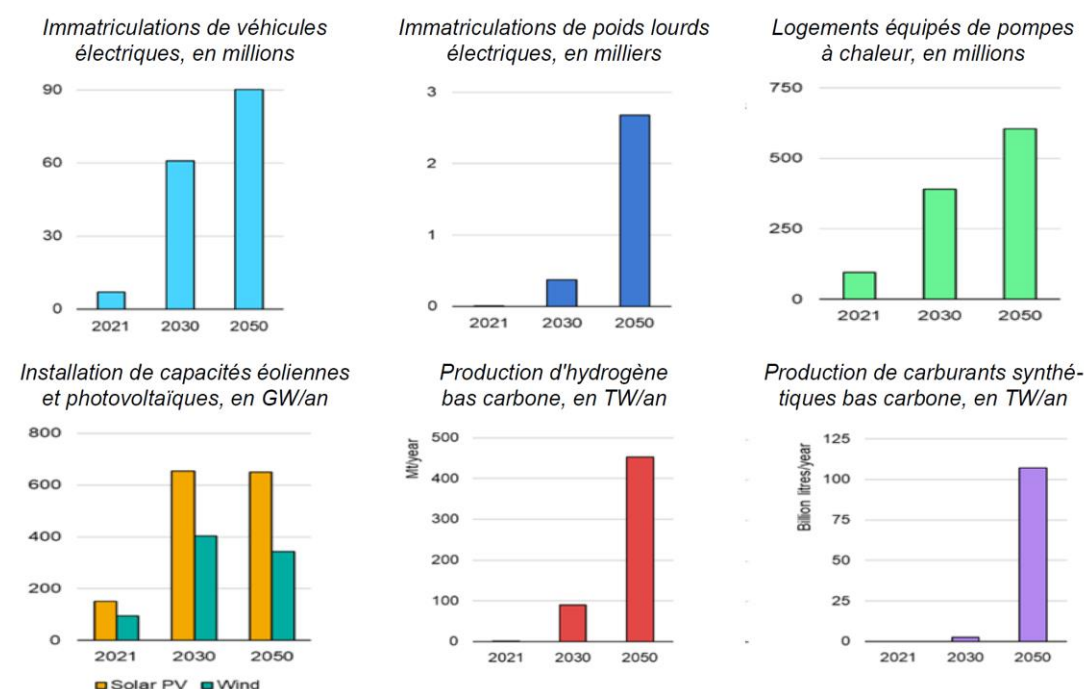
Dans son édition la plus récente du rapport *Energy Technology Perspectives*¹, l'AIE identifie huit « piliers » principaux pour la décarbonation du système énergétique : changement de comportement et réduction de la demande, efficacité énergétique, hydrogène, électrification, bioénergie, éolien et solaire, captage-stockage-

¹ AIE (2023), *Energy Technology Perspectives 2023*, Agence internationale de l'énergie, janvier.

utilisation du carbone (CCUS), et autres changements de combustibles (par exemple, passage du charbon et du pétrole au gaz naturel, nucléaire, hydroélectricité, géothermie, énergie solaire concentrée et énergie marine).

Parmi ces piliers, le rapport se concentre notamment sur six technologies et infrastructures identifiées comme « clés » (voir Graphique 23), qui représentent près de 50 % des réductions d'émissions cumulées du scénario de 2021 à 2050. Il s'agit de l'électricité bas-carbone, des pompes à chaleur, des voitures électriques, des poids lourds à pile hydrogène, de l'hydrogène bas-carbone et des hydrocarbures synthétiques bas-carbone. Certaines de ces technologies s'inscrivent dans un seul des huit piliers (comme la voiture électrique), tandis que d'autres sont plus transversales (comme l'hydrogène bas-carbone).

Graphique 23 – Déploiement des six technologies de décarbonation « clés » dans le scénario ZEN 2050 (édition 2023)



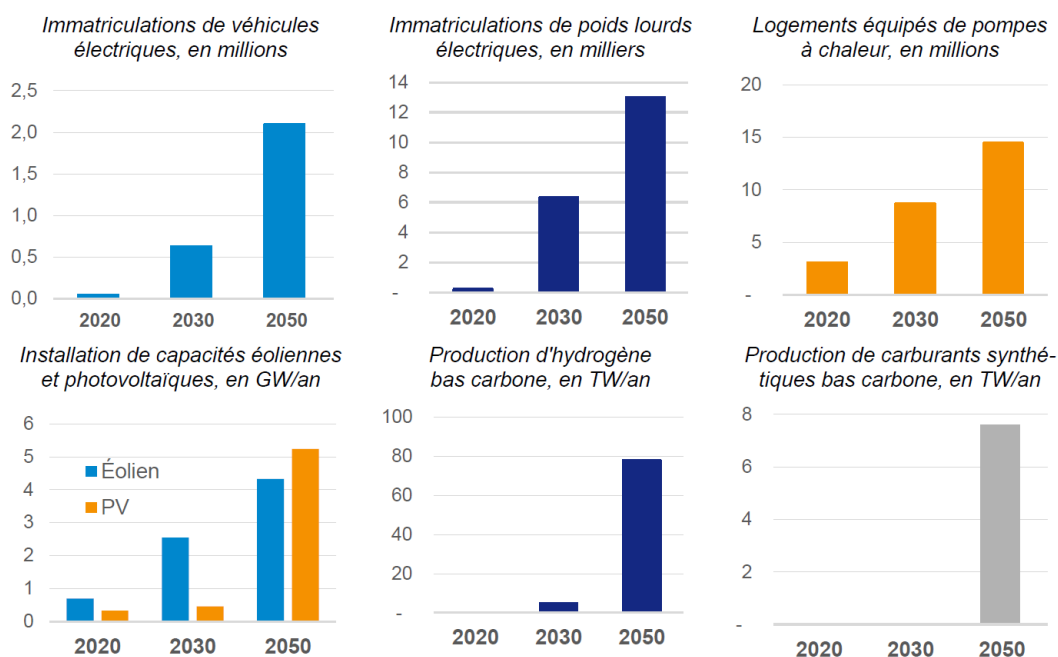
Source : AIE (2023), *Energy Technology Perspectives 2023*, Agence internationale de l'énergie, janvier, figure 1.6, p. 48

Le déploiement de ces six technologies « clés » dans le scénario TiTAN (voir Graphique 24) suit dans l'ensemble une dynamique semblable à celle du scénario ZEN 2050. C'est particulièrement vrai pour les voitures électriques, les pompes à chaleur et l'hydrogène bas-carbone, qui voient dans les deux scénarios une augmentation considérable des installations ou productions de 2021 à 2050, avec des niveaux comparables pour 2030. La trajectoire de déploiement des poids lourds décarbonés est également d'allure semblable entre les deux scénarios, même si

TITAN mise davantage sur la variante batterie que sur celle à pile à combustible, probablement du fait d'hypothèses plus optimistes sur leur autonomie.

En revanche, le déploiement des capacités de production d'électricité bas-carbone (éolien et photovoltaïque) à l'horizon 2030 est encore croissant dans le scénario TITAN tandis qu'il atteint dans ZEN 2050 son niveau de long terme. Ce résultat s'explique probablement par les différences de périmètre géographique : la France est déjà bien dotée en capacités de production électrique décarbonées grâce au nucléaire et aux renouvelables, tandis que le reste du monde part de plus loin pour réaliser une électrification bas-carbone, notamment les pays en développement. En revanche, la puissance installée à 2050 est cohérente avec ZEN 2050.

Graphique 24 – Déploiement des six technologies « clés » identifiées par l'AIE, scénario « TITAN-budget »



Source : CGDD, modèle TITAN

3.3. Synthèse des simulations centrales

Les résultats des différentes simulations présentées ci-dessus sont résumés dans le Tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12 – Synthèse des résultats des simulations (en €₂₀₂₃/tCO₂)

Année	Commission Quinet 2019	Ti TAN <i>en flux</i>	ThreeME <i>en flux</i>	Vulcain <i>en flux</i>	Ti TAN <i>en budget carbone</i>
2025	187	115	232	65	263
2030	278	150	331	140	308
2035	417	312	575	346	360
2040	555	510	1278	1374	422
2045	692	741	1818	4326	494
2050	861	1100	-	11909	578
2055	-	1176	-	-	676

Source : commission

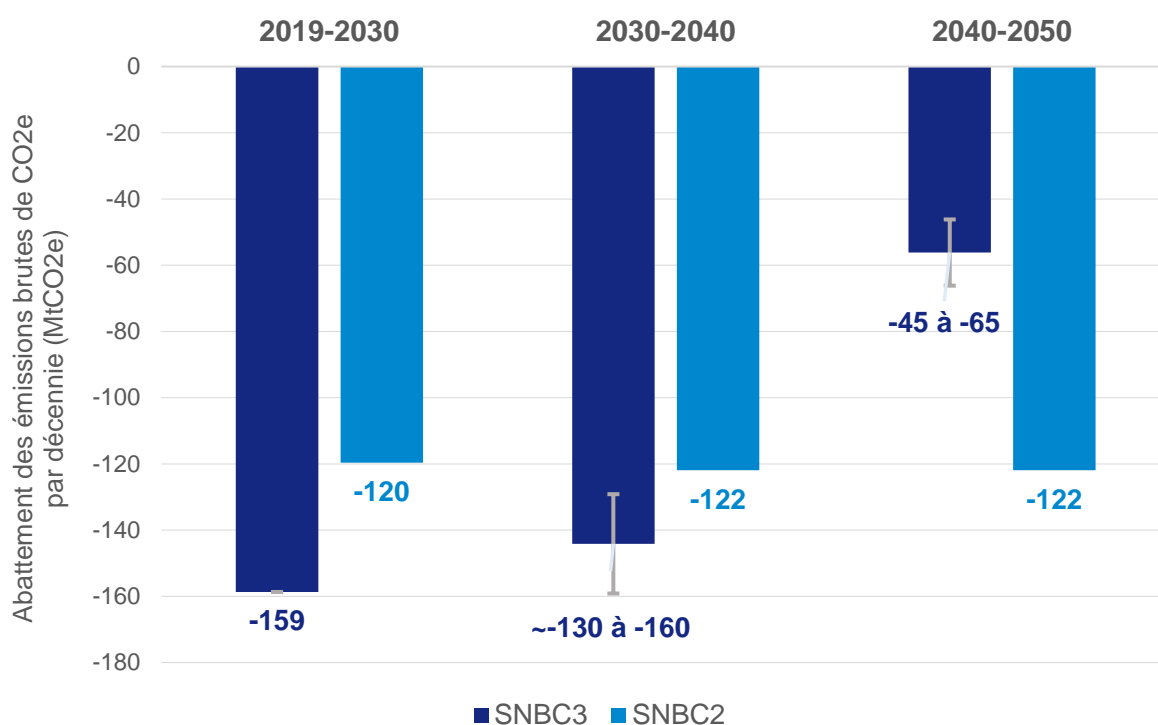
La confrontation des deux approches possibles – l'une fondée sur la déclinaison des objectifs en flux, l'autre sur l'optimisation d'un budget carbone – fait ressortir les éléments suivants :

- Le point de départ 2025 est sensiblement relevé dans la simulation Ti TAN en budget carbone en comparaison de la simulation en flux du même modèle. Ce niveau de départ de la simulation Ti TAN en budget est comparable à celui de la simulation du modèle macroéconomique ThreeME qui modélise le plus finement les dynamiques de court terme. Les autres simulations restent proches de la valeur de la trajectoire 2019.
- À l'horizon 2030, les simulations Ti TAN en budget carbone et ThreeME – borne haute de simulations en flux – donnent toutes deux des résultats peu différents de celui de la trajectoire de 2019. Selon les modèles, le relèvement de l'ambition en 2030 peut être en partie « accommodé » par des déploiements de technologies bas-carbone plus rapidement matures que prévu et des actions mieux identifiées (par la SNBC 3) de sobriété individuelle et collective.
- Les résultats des simulations en flux affichent, pour les trois modèles, une pente supérieure au taux d'actualisation, là où la simulation en budget carbone est par construction calée sur ce taux.

La forte croissance de la valeur de l'action pour le climat au fil du temps dans les simulations en flux – une caractéristique déjà identifiée dans l'élaboration de la trajectoire de 2019 – nécessite quelques éclaircissements. Elle pourrait simplement refléter une répartition des efforts dans le temps « non optimisée » – insuffisants en début de période, trop élevés en fin de période. Cette explication peut contenir une part de vérité : la simulation en budget carbone produit bien un niveau d'efforts à court terme supérieur d'ici 2030 à la trajectoire en flux. Elle ne saurait se suffire à elle-même pour deux raisons :

- la première est que la SNBC 3 organise déjà un rééquilibrage important des efforts dans le temps par rapport à la SNBC 2, comme le montre le Graphique 25 ci-dessous ;
- la seconde est que les modèles sous-estiment encore les coûts d'ajustement à court terme et peinent à décrire la convergence finale vers ZEN (voir Tableau 13).

Graphique 25 – Répartition des efforts dans le temps, de la SNBC 2 à la SNBC 3



Note : la SNBC 3 est encore en cours de construction pendant les travaux de la commission. Le projet de SNBC 3 soumis à concertation en novembre 2024 présente une trajectoire jusqu'en 2030. La SNBC 3 finale qui sera publiée en 2025 précisera la trajectoire post 2030 (présentées dans ce document sous forme de fourchettes). La commission Quinet a toutefois pu intégrer les travaux les plus récents pour l'élaboration de la valeur de l'action pour le climat.

Source : DGEC

Tableau 13 – Taux de croissance de la valeur de l'action pour le climat dans les simulations en flux

	Niveau en 2025 (€)	Croissance annuelle moyenne 2025-2040
ThreeME		+ 12 %
TITAN	115	+10 %
Vulcain	65	+22 %

Source : commission

Au total, les quantités d'émission à abattre dans la décennie 2040 sont sensiblement inférieures à celle des précédentes décennies, mais ce sont des émissions souvent difficiles à abattre, avec des technologies encore immatures que les modèles ne peuvent précisément décrire. D'où cette tendance à « l'envolée » des trajectoires à l'approche de ZEN. Cela explique aussi la forte sensibilité de la valeur de l'action pour le climat aux hypothèses de puits qui déterminent le quantum d'émissions brutes compatibles avec l'objectif ZEN (voir section 4.2 *infra*).

4. Des simulations soumises à des incertitudes

Les simulations ont été complétées par un ensemble de variantes permettant d'apprécier la sensibilité des résultats aux hypothèses les plus structurantes – que celles-ci portent sur le contexte international (perspectives technologiques, prix des énergies fossiles, niveau d'effort et de coopération climatique) ou sur le contexte national (potentiels d'absorption des puits naturels et technologiques, sobriété ou croissance économique). Ces simulations sont résumées dans le Tableau 14 ci-dessous.

Les variantes ont été calibrées pour correspondre à des chocs importants mais plausibles, en s'appuyant autant que faire se peut sur les valeurs alternatives disponibles dans les publications internationales.

Tableau 14 – Synthèse des analyses de sensibilité

Variante	Impact sur la valeur de l'action pour le climat (vs scénario de référence)	Canaux de transmission modélisés
Hausse du progrès technique	Baisse de la VAC	Baisse des coûts d'abattement ou hausse des élasticités de substitution entre énergies fossiles et bas-carbone
Hausse du prix des énergies fossiles	Baisse de la VAC	Substitution entre énergies fossiles et bas-carbone
Efforts européens isolés (bouclage macroéconomique à progrès technique inchangé)	Impact peu significatif sur la VAC	- Pertes de compétitivité industrielle - Maintien des prix des énergies fossiles à un niveau élevé
Variation des puits de carbone	Hausse (baisse) de la VAC En cas de baisse (hausse) de la capacité des puits	Modification de la contrainte sur les émissions brutes.
Sobriété	Hausse (baisse) de la VAC En cas de réduction (renforcement) des actions de sobriété	Modification du besoin d'investissements
Hausse du PIB	Hausse de la VAC	Hausse des émissions spontanées, nécessitant de renforcer les efforts

Source : commission

En l'absence d'éléments suffisamment robustes pour « probabiliser » les différentes variantes sur chaque hypothèse, les analyses présentées ne permettent pas de quantifier avec rigueur l'incertitude autour des trajectoires de la valeur de l'action pour le climat estimées et ne constituent pas une évaluation de l'incertitude à proprement parler. Toutefois, quelques enseignements généraux se dégagent des différentes simulations réalisées.

- La valeur de l'action pour le climat dépend crucialement des hypothèses sur les technologies et, dans une moindre mesure, sur la sobriété.
- Les effets des puits de carbone sont importants et asymétriques. Des puits plus élevés allègent la contrainte sur les émissions brutes ; des puits plus bas la renforcent de manière drastique car les dernières émissions sont les plus difficiles et potentiellement les plus coûteuses à abattre. Compte tenu d'un niveau incompressible d'émissions en l'état actuel des technologies, l'objectif ZEN ne serait pas atteignable dans un monde sans puits.

- Les hypothèses sur le PIB ont un impact décroissant dans le temps, à mesure que l'économie se décarbone et que les émissions se découplent du PIB.
- À progrès technique donné, la valeur de l'action pour le climat est peu sensible au niveau de coopération internationale, même si celui-ci est critique pour la compétitivité industrielle et la croissance de l'Europe.

4.1. La sensibilité aux hypothèses technologiques

La modélisation des leviers technologiques passe notamment par les élasticités de substitution¹ entre énergies carbonées (gaz, pétrole, charbon) et bas-carbone (nucléaire, éolien, solaire, géothermie, hydraulique). Plus ces élasticités sont élevées, plus il est aisé de substituer des technologies bas-carbone à des technologies carbonées et donc moins il est coûteux de décarboner l'économie.

Dans ThreeME, si on laisse la valeur initiale de l'élasticité de substitution inchangée à 0,8 et qu'on la double ensuite par rapport au scénario central (passant de 1,5 à 3 en 2030, de 3 à 6 en 2040 et de 6 à 10 en 2050²), la valeur de l'action pour le climat serait réduite de 14 % en 2030 et de 28 % en 2045. Vulcain donne des résultats similaires.

Tableau 15 – Valeur de l'action pour le climat dans plusieurs scénarios de disponibilité des technologies de décarbonation (€₂₀₂₃/tCO_{2e}), selon l'évolution des élasticités de substitution

	Année	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Vulcain	Scénario central	65	140	346	1 374	4 326	11 909
	Élasticités doublées	56	121	302	1 116	3 104	7 385
ThreeME	Scénario central	209	331	573	1278	1818	-
	Élasticités doublées	205	285	457	911	1317	-

Sources : modèle Vulcain version 2 du CGDD, calculs CGDD ; modèle ThreeME, DG Trésor

¹ Dans ThreeME, la modélisation imbriquée à élasticités de substitution constantes fournit un *proxy* imparfait du progrès technique.

² À horizon 2050, il a été décidé de retenir la valeur maximale de la littérature, utilisée dans le modèle E-QUEST, et non de doubler l'élasticité de substitution.

4.2. La sensibilité aux hypothèses de puits

L'atteinte de la neutralité carbone en 2050 implique par construction que les émissions nationales résiduelles de la France soient égales à la capacité d'absorption des puits de carbone français, artificiels et naturels. Dans ce cadre, on réalise deux variantes distinctes pour évaluer la sensibilité de la valeur de l'action pour le climat à des niveaux de puits qui se situeraient au-delà des fourchettes de la SNBC 3. L'une porte sur les puits naturels, l'autre sur les puits technologiques, car ces deux types de puits ne présentent pas les mêmes caractéristiques économiques :

- les puits naturels sont gratuits et, à ce titre, ont un effet direct sur la contrainte carbone : une augmentation des puits naturels relâche la contrainte carbone sur les émissions brutes, une dégradation des puits naturels la resserre ;
- les puits technologiques ont un coût : élargir le potentiel de puits technologique ne signifie pas *a priori* qu'ils vont être utilisés – tout dépend des coûts comparés des technologies à émissions négatives par rapport aux technologies d'abattement.

Un test de sensibilité commun aux trois modèles a été réalisé, en produisant deux variantes avec des chocs symétriques de +/-5 MtCO₂e/an en 2050¹ sur le niveau des puits naturels. Les différentes simulations (voir Graphique 26) livrent trois enseignements :

- la valeur de l'action pour le climat est très sensible aux hypothèses de puits ;
- l'impact sur la valeur de l'action pour le climat est d'autant plus important que le puits est faible et se rapproche d'un niveau nul. En effet, les coûts d'abattement augmentent exponentiellement à mesure que l'on approche d'une exigence de zéro émission brute ;
- dans l'hypothèse la plus défavorable de forte dégradation des puits naturels (baisse des puits de 20 MtCO₂e), le problème devient insoluble : l'objectif d'abattement ne peut être atteint, même à des valeurs très élevées du coût d'abattement marginal.

S'agissant des puits technologiques, trois tests de sensibilité ont été réalisés avec TiTAN² :

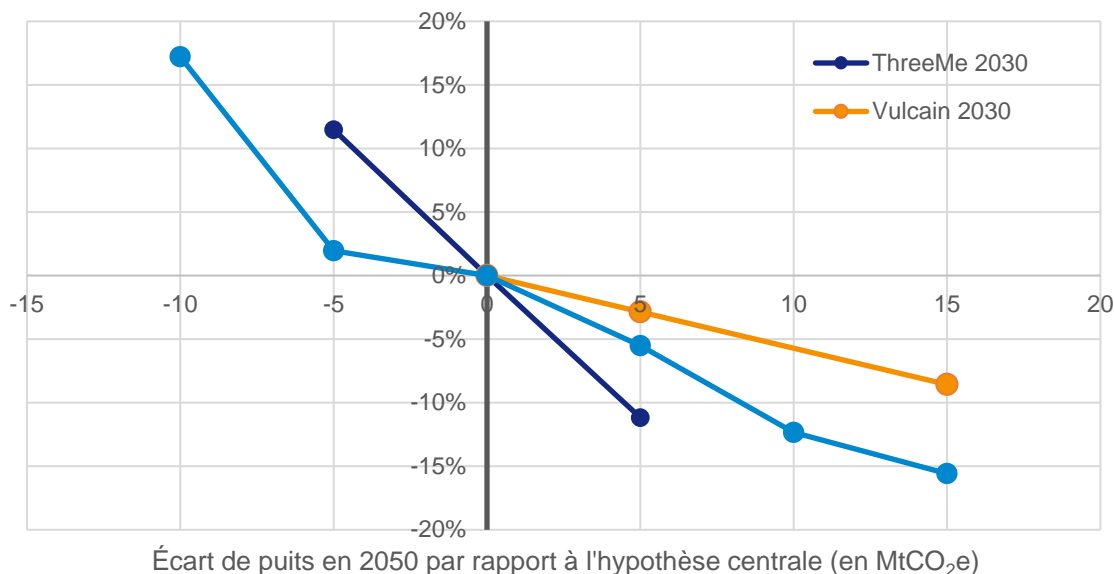
- dans les deux premiers tests, le plafond annuel sur le stockage technologique de CO₂ a été ajusté tout le long de la trajectoire, ce qui conduit à un écart relativement modeste sur la capacité de stockage cumulée (+/- 20% de capacité cumulée sur 2025-2060) ;
- dans la troisième variante, la capacité de stockage technologique de CO₂ a été entièrement éliminée.

¹ Il est supposé que la dégradation des puits influe sur la trajectoire de réduction des émissions dès 2030.

² Les puits technologiques intègrent les technologies de capture et valorisation du dioxyde de carbone (CCUS), de capture atmosphérique (DAC) – contrainte à 5 MtCO₂/an maximum compte tenu de l'incertitude sur sa faisabilité – et le stockage géologique.

La valeur de l'action pour le climat estimée réagit faiblement (-3 %) à une légère augmentation des capacités des puits, et beaucoup plus fortement (+11 %) à une légère diminution. La variante sans stockage géologique de CO₂ apparaît quant à elle infaisable pour le modèle.

Graphique 26 – Sensibilité de la valeur de l'action pour le climat aux hypothèses de puits (écart au scénario central en %)



Source : CGDD, modèles TiTAN et Vulcain ; DG Trésor, modèle ThreeME

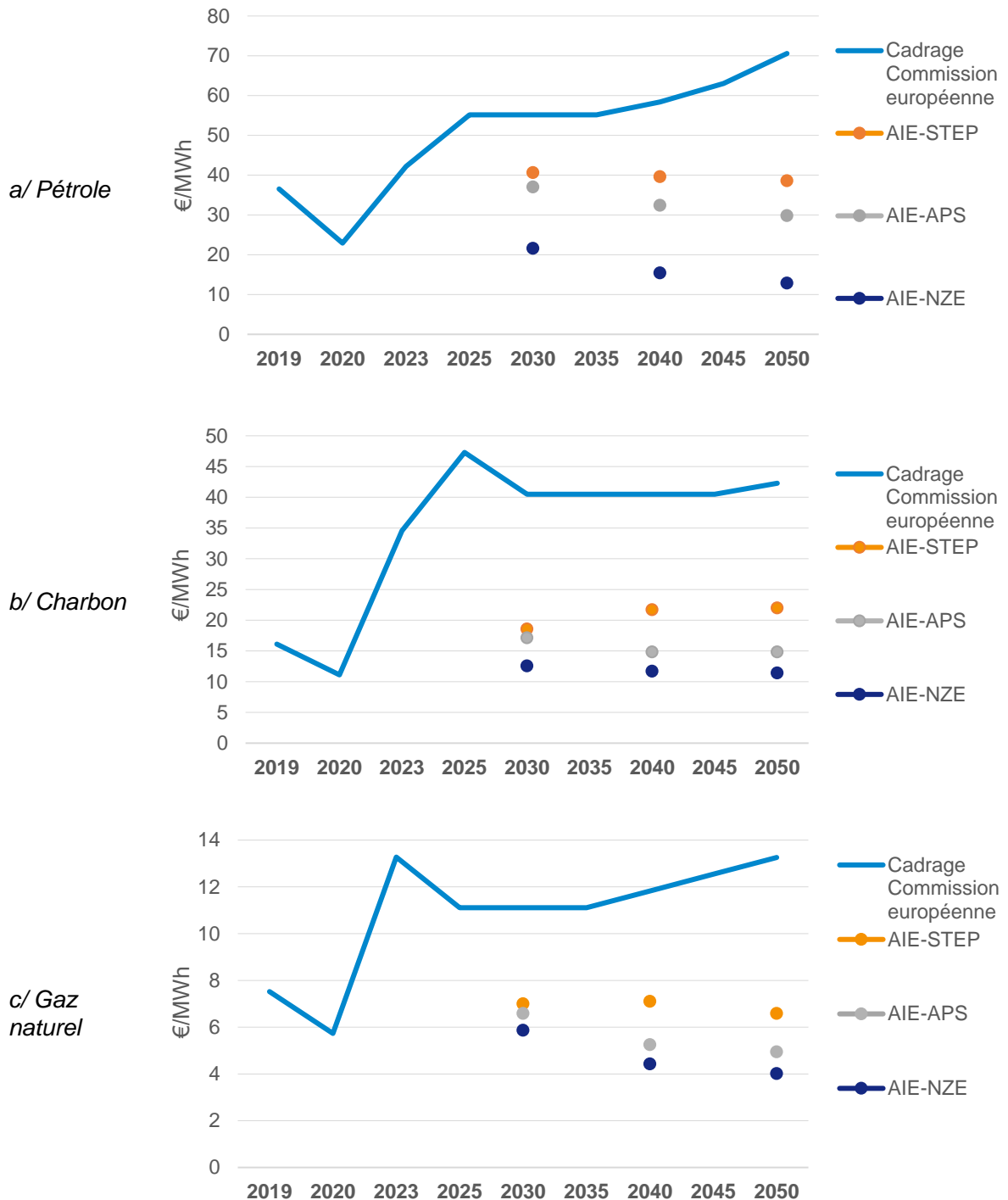
4.3. La sensibilité aux hypothèses de prix du pétrole

Le niveau anticipé des prix des énergies fossiles, en partie lié au contexte international et au degré d'ambition de réduction des émissions de GES dans les autres régions du monde, influence directement la valeur de l'action pour le climat via le prix relatif des options bas-carbone. Pour rendre compte de cet effet, plusieurs scénarios alternatifs ont été simulés avec ThreeME et TiTAN.

Dans TiTAN, quatre scénarios alternatifs ont été produits, dont une multiplication par deux du prix des énergies fossiles par rapport aux hypothèses de la Commission européenne et trois scénarios reprenant les projections de prix des énergies fossiles des trois scénarios-phares de l'AIE¹ : *Stated Policies (STEP)*, *Announced Pledges (AsPS)*, et *Net Zero Emissions by 2050 (ZEN)*. Ces trois derniers scénarios présentent tous des trajectoires de prix des énergies fossiles inférieures aux projections du cadrage de la Commission (voir Graphique 27).

¹ AIE (2024), *World Energy Outlook 2024*, Agence internationale de l'énergie, octobre, p. 78.

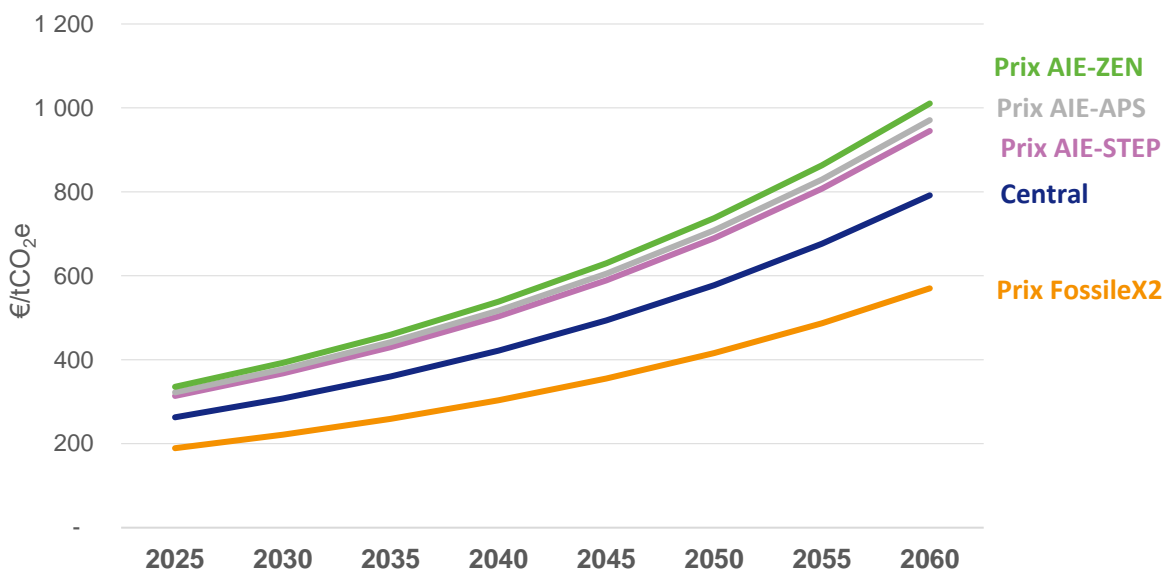
Graphique 27 – Projection des prix d’approvisionnement en énergies fossiles pour l’Union européenne, selon le cadrage de la Commission européenne et les différents scénarios de l’AIE (€/MWh)



Source: AIE (2024), *World Energy Outlook 2024*, Agence internationale de l'énergie, octobre, p. 90

La valeur de l'action pour le climat estimée en approche budget est respectivement plus élevée de 19 %, 23 % et 28 % par rapport à la référence dans les variantes alignées sur les prix des scénarios STEP, APS et ZEN (voir Graphique 28).

Graphique 28 – Coût marginal d'abattement estimé par TITAN selon l'hypothèse de prix des énergies fossiles



Source : CGDD, modèle TITAN

Dans ThreeME, deux scénarios ont été modélisés : une multiplication par deux du prix des énergies fossiles par rapport aux hypothèses de la Commission européenne et une division par deux. Selon ces tests, la multiplication par deux du prix des énergies fossiles réduirait sensiblement la trajectoire du signal-prix du carbone, de 21 % en 2030 :

- la hausse du prix des énergies fossiles accélère en effet le déclenchement des actions de décarbonation des ménages et des entreprises en les incitant à substituer des énergies bas-carbone aux énergies fossiles ; par ailleurs, elle constitue un choc d'offre négatif pour l'économie domestique, ce qui diminue l'activité, donc les émissions ;
- la division par deux du prix des énergies fossiles (soit un scénario cohérent avec le scénario APS¹ de l'AIE) augmente le besoin de signal-prix de l'ordre de 10 % à partir de 2030 (voir Tableau 16).

¹ Announced Pledged Scenarios.

Tableau 16 – Valeur de l'action pour le climat dans plusieurs scénarios de prix des énergies fossiles (€₂₀₂₃/tCO_{2e})

Modèle	Scénario	Valeur 2030 (€ ₂₀₂₃ /tCO _{2e})	Valeur 2050 (€ ₂₀₂₃ /tCO _{2e})	Écart à Central (%) en 2050
TiTAN	Central (cadrage Commission européenne)	308	578	-
	Scénario prix faibles (AIE-APS)	377	709	+23 %
ThreeME	Central (cadrage Commission européenne)	331	1 818*	-
	Scénario division par deux des prix	363	1 982*	+9 %

* Valeur 2045.

Source : CGDD, modèle TiTAN ; DG Trésor, modèle ThreeME

4.4. La sensibilité aux hypothèses de coopération internationale

Dans les scénarios centraux précédemment présentés, l'Union européenne suit une trajectoire de décarbonation identique à celle de la France, tandis que le reste du monde réalise des efforts à hauteur des NDC (contributions déterminées au niveau national), soit approximativement une division par deux des émissions à l'horizon 2050.

Le niveau d'effort d'atténuation et de coopération entre les différentes régions du monde est susceptible d'affecter la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat à un double titre :

- D'abord, des efforts insuffisants peuvent ralentir le rythme de production et de diffusion du progrès technique bas-carbone, ce qui renchérit les coûts d'abattement (en raison du déploiement plus lent des technologies « vertes ») ;
- Ensuite, des efforts dissymétriques et mal coordonnés peuvent renchérir le coût de l'atténuation.

On se focalise ici sur ce second aspect, en testant avec le modèle Vulcain une variante dans laquelle l'Union européenne ferait seule un effort climatique (voir Tableau 17). Ce scénario implique que l'écart de compétitivité se creuse entre les producteurs européens, qui font face à des coûts élevés de décarbonation, et leurs concurrents étrangers. Ce scénario comporte donc des risques élevés de pertes de compétitivité et de

fuites de carbone. La valeur de l'action pour le climat reste globalement inchangée, ce faible impact masquant des enjeux industriels et économiques importants :

- une action isolée de l'Europe conduit à la délocalisation hors du territoire des usines les plus émissives, aboutissant immédiatement à une réduction de l'intensité carbone de l'économie et à une baisse spontanée des émissions par désindustrialisation ;
- un faible effort mondial tend à renchérir le prix des énergies fossiles (de 8 % à l'horizon 2050), ce qui favorise la substitution des produits bruns par les produits verts.

Tableau 17 – Valeur de l'action climat en cas d'efforts européens isolés (€₂₀₂₃/tCO_{2e})

Modèle	Année	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Vulcain	Scénario central	65	140	346	1 374	4 326	11 909
	Effort de l'UE seule	62	136	338	1 355	4 268	11 719

Source : modèle Vulcain version 2 du CGDD ; calculs CGDD

Sans doute convient-il de rappeler que la valeur de l'action pour le climat serait sensiblement plus faible que les évaluations présentées ici dans un scénario hypothétique où le monde parviendrait à mettre en place un prix unique du carbone, à travers un marché mondial de quotas – ce qui permettrait à la fois d'exploiter tous les gisements d'abattement à faible coût et de stimuler le progrès technique.

4.5. La sensibilité aux hypothèses de sobriété

Les modèles TiTAN et ThreeME diffèrent, on l'a vu, dans leur structure et donc dans la manière dont est prise en compte de la sobriété.

Dans TiTAN, la demande est exogène et la trajectoire centrale intègre donc le scénario AMS (avec mesures supplémentaires) de la SNBC 3. Un test de sensibilité a été réalisé en construisant un jeu alternatif d'hypothèses de demande aligné sur le scénario AME¹ de la SNBC 3, qui représente une évolution tendancielle de la demande en services énergétiques (voir [Annexe 6](#)). Ce test, dit « sans sobriété », aboutit à un coût marginal d'abattement accru de près de 35 % par rapport au scénario central.

Dans ThreeME, la demande est explicitement modélisée. La trajectoire centrale repose sur le scénario AME, de sorte que les simulations permettent de décrire le signal-prix supplémentaire nécessaire pour atteindre les objectifs. Un test de sensibilité a été réalisé en incluant les hypothèses supplémentaires du scénario AMS. Ce test, dit « avec sobriété

¹ Voir DGEC (2024), « [Synthèse du scénario avec mesures existantes 2024](#) », octobre.

supplémentaire », aboutit à un signal-prix du carbone à moyen terme plus faible pour atteindre les mêmes cibles de décarbonation. En 2030, la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat est ainsi réduite de 5 % par rapport à la trajectoire centrale.

Les deux simulations (voir Tableau 18) ne peuvent pas être mises exactement sur le même plan car elles sont effectuées sur la base de modélisations différentes :

- dans TiTAN, la sobriété est supposée « gratuite » et vient directement réduire l'abattement à réaliser par le système énergétique. Une sobriété forte réduit mécaniquement le besoin d'investir dans des technologies décarbonées plus coûteuses et réduit donc le coût marginal d'abattement. Inversement, une sobriété faible renchérit directement le coût de la transition ;
- L'effet de la sobriété dans ThreeME est moins mécanique puisque les comportements de demande sont modélisés et incorporent des effets rebond micro et macroéconomiques. Lorsque la sobriété augmente, par exemple, le besoin d'investissement diminue, ce qui libère un potentiel de consommation, et donc d'émissions. L'impact favorable sur la valeur de l'action pour le climat en est atténué d'autant.

Tableau 18 – Sensibilité de la valeur de l'action pour le climat estimée par les modèles aux hypothèses de sobriété (€₂₀₂₃/tCO_{2e})

Modèle	Scénario	Valeur 2030 (€ ₂₀₂₃ /tCO _{2e})	Valeur 2050 (€ ₂₀₂₃ /tCO _{2e})	Écart à Central (%) en 2050
TiTAN	Central (AMS)	308	578	-
	« Sans sobriété » (proche de l'AME)	413	775	+34 %
ThreeME	« Avec sobriété supplémentaire » (proche de l'AMS)	318	1 719*	-5 %*
	Central (AME)	331	1 818*	-

* Valeur 2045.

Source : CGDD, modèle TiTAN ; DG Trésor, modèle ThreeME

4.6. La sensibilité aux hypothèses de croissance économique

L'incidence du PIB sur la valeur de l'action pour le climat peut être illustrée grâce à ThreeME en mobilisant les prévisions du Plan budgétaire et structurel à moyen terme¹ européen sur la trajectoire de croissance tendancielle du PIB, qui tablent sur un niveau de croissance légèrement plus élevé à court-moyen terme que celui fourni par la Commission européenne (mais plus faible en fin de période²) : pour un PIB supérieur de 3 points en 2030, la valeur de l'action pour le climat est mécaniquement rehaussée de 7 % (voir Tableau 19).

Tableau 19 – Sensibilité de la valeur de l'action pour le climat estimée par les modèles aux hypothèses de PIB (en €₂₀₂₃/tCO_{2e})

Modèle	Scénario	Valeur 2030 (€ ₂₀₂₃ /tCO _{2e})
ThreeME	Croissance du Plan budgétaire et structurel à moyen terme (niveau de PIB relevé de 7 % en 2030)	364
	Central	331

Source : DG Trésor, modèle ThreeME

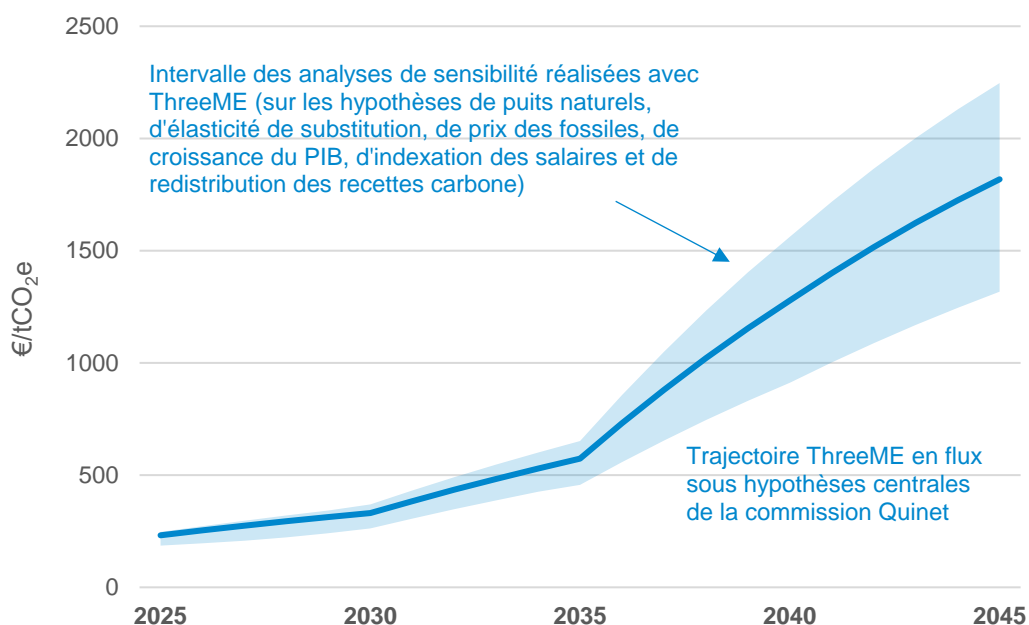
4.7. Synthèse des incertitudes

On peut résumer graphiquement pour chaque modèle les analyses de sensibilité individuelle réalisées (voir page suivante les Graphique 29 et 30 respectivement pour ThreeMe et TiTAN). Sans prétendre constituer une mesure objective des incertitudes entourant la trajectoire, ces variantes, élémentaires et non probabilisées, donnent une première évaluation des plages de valeur possibles dans lesquelles la trajectoire retenue par la commission a vocation à s'inscrire.

¹ « Plan budgétaire et structurel à moyen terme 2025-2029. Complément au rapport économique, social et financier » publié en octobre 2024.

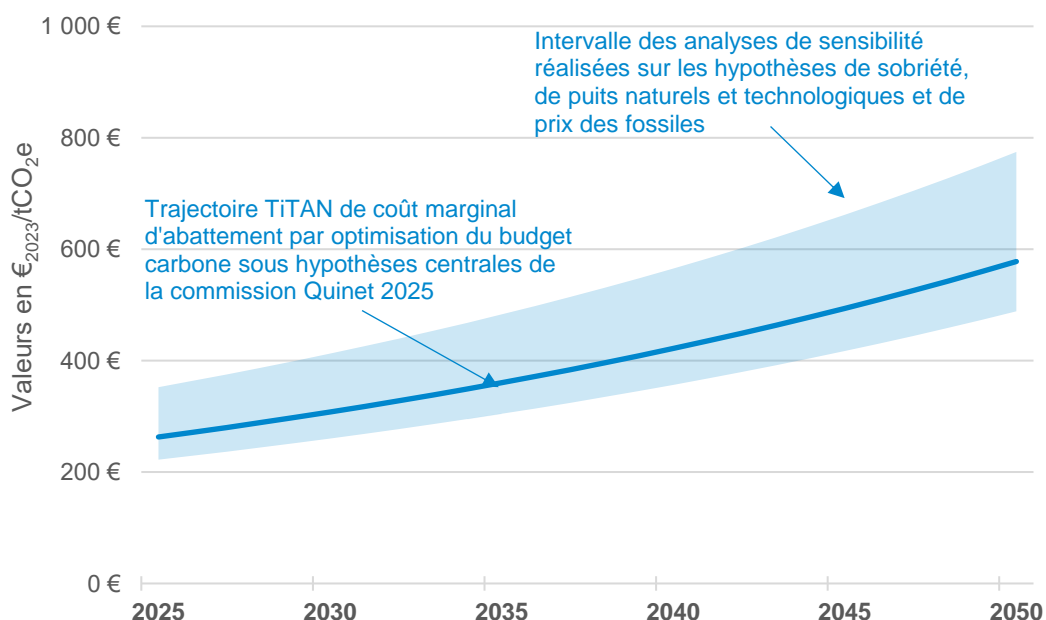
² Si le taux annuel moyen de croissance potentielle est globalement identique sur l'ensemble de la période considérée entre les deux sources de données, la différence dans la dynamique de croissance implique un niveau d'activité supérieur d'environ 3 points de PIB en 2030 avec la chronique du plan budgétaire et structurel à moyen terme par rapport à celle de la Commission européenne.

Graphique 29 – Synthèse des analyses de sensibilité sur les simulations ThreeME



Source : DG Trésor

Graphique 30 – Synthèse des analyses de sensibilité sur les simulations TiTAN en budget carbone



Source : CGDD

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

Approfondir les travaux de modélisation engagés par les administrations des ministères en charge de la Transition écologique et de l'Économie, notamment pour :

- modéliser l'ensemble des secteurs de l'économie concernés par la décarbonation, notamment l'usage des sols, les forêts et l'agriculture ;
- approfondir la quantification des incertitudes associées à la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat.

5. Ces travaux aboutissent à une nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat

5.1. Les ingrédients de construction de la nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat

La trajectoire de la valeur de l'action pour le climat retenue par cette commission s'appuie sur une délibération collective, prenant en compte les différents ingrédients successivement présentés dans ce rapport :

- des objectifs politiques de décarbonation clairs et ambitieux : - 50 % d'émissions brutes en 2030, ZEN en 2050 ;
- une prise en compte des enseignements de la littérature économique sur les stratégies optimales de décarbonation ;
- une analyse des perspectives technologiques permettant d'identifier les principaux gisements d'abattement et leurs coûts associés ;
- des simulations « en flux » et en budget carbone, réalisées par plusieurs modèles, permettant de prendre la mesure des plages de valeur plausibles de la valeur de l'action pour le climat et de sa sensibilité aux grandes hypothèses de la SNBC 3.

In fine, la commission s'est livrée à une lecture « raisonnée » de ces différents ingrédients pour les combiner selon la logique suivante.

- La commission prend en compte les objectifs de décarbonation 2030 et 2050, en s'affranchissant cependant d'une lecture littérale de la trajectoire pluriannuelle reliant le point de départ 2025 à ces deux grands jalons. Elle s'est donc appuyée de manière privilégiée sur une approche en budget carbone consistant à transformer la totalité des

émissions de gaz à effet de serre restant à abattre en un budget carbone implicite dont la consommation progressive serait librement optimisée¹.

- La commission prend en compte les résultats des modèles, en accordant un crédit particulier à deux types de simulations : la simulation TiTAN en budget carbone et la simulation ThreeMe en flux pour la première moitié de la période, dans la mesure où ce modèle décrit le plus finement les dynamiques économiques de court terme. Ces deux simulations convergent notamment vers un relèvement de la valeur initiale de la valeur de l'action pour le climat.
- La commission considère dans le même temps que la légitimité des modèles s'éémousse lorsque l'horizon s'allonge et que la décarbonation requiert des changements de comportement et de technologies que les modèles ne savent pas prendre en compte, soit parce qu'ils sont calés sur le passé, soit parce que les évolutions prospectives restent très incertaines.
- Dans un tel contexte, la commission retient une valeur initiale de la valeur de l'action pour le climat permettant d'atteindre les objectifs au moindre coût, et dont l'évolution dans le temps est alignée sur le taux d'actualisation. Les trajectoires des commissions précédentes, bien que calées sur des objectifs de réduction des flux d'émissions, avaient déjà fait le choix de s'écarter des modèles à mi-période pour aligner la croissance de la valeur de l'action pour le climat sur le taux d'actualisation socioéconomique. Cette fois, la possibilité de réaliser des simulations directement en budget carbone offre l'opportunité, en donnant plus de robustesse à la valeur initiale, de rapprocher la pente de la trajectoire du taux d'actualisation dès le début de période.
- La commission a enfin réalisé *ex post* deux contrôles de cohérence :
 - s'assurer que la trajectoire est bien cohérente avec le respect des objectifs 2030-2050. Naturellement, le niveau de confort qui peut être donné est plus important à court terme (2030) qu'à long terme (2050) compte tenu d'un cumul d'incertitude sur les technologies, les puits et les comportements ;
 - s'assurer que la valeur de 2050 est cohérente avec les perspectives technologiques disponibles sur les coûts d'abattement. De ce point de vue, on remarquera notamment que le point de sortie de la trajectoire retenue est cohérent avec celui retenu par le *Climate Change Committee* britannique² (voir Chapitre 1).

¹ Le secteur des terres et forêts ainsi que l'agriculture sont toutefois paramétrés, faute de bien savoir modéliser leurs coûts d'abattement.

² Climate Change Committee (2025), *The Seventh Carbon Budget: Advice for the UK Government*, février.

5.2. La nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat

En tenant compte de ces ingrédients, la nouvelle trajectoire établie par la commission est présentée dans le Graphique 31 page suivante :

- cette nouvelle trajectoire acte une revalorisation initiale de la valeur du carbone, en miroir du relèvement de l'objectif 2030. Celle-ci s'établit à 256€₂₀₂₃/tCO_{2e} en 2025, soit une marche supplémentaire significative par rapport au niveau prévu par la trajectoire de 2019 (187 €₂₀₂₃/tCO_{2e}) ;
- le « jalon 2030 », à 300 €₂₀₂₃/tCO_{2e}, est du même ordre de grandeur que celui de la trajectoire précédente, une fois pris en compte les effets de l'inflation¹. C'est en effet le relèvement de la chronique 2025-2030, et non celle du seul point 2030, qui garantit le respect de l'objectif de -50 % ;
- le taux de croissance de la valeur de l'action pour le climat est calé dès le départ sur le taux d'actualisation de 3,2 %, afin de garantir une neutralité intertemporelle des efforts. Cet alignement sur le taux d'actualisation implique un lissage de la courbe dans le temps, avec une pente plus faible que la précédente puisque le taux d'actualisation a été revu à la baisse.

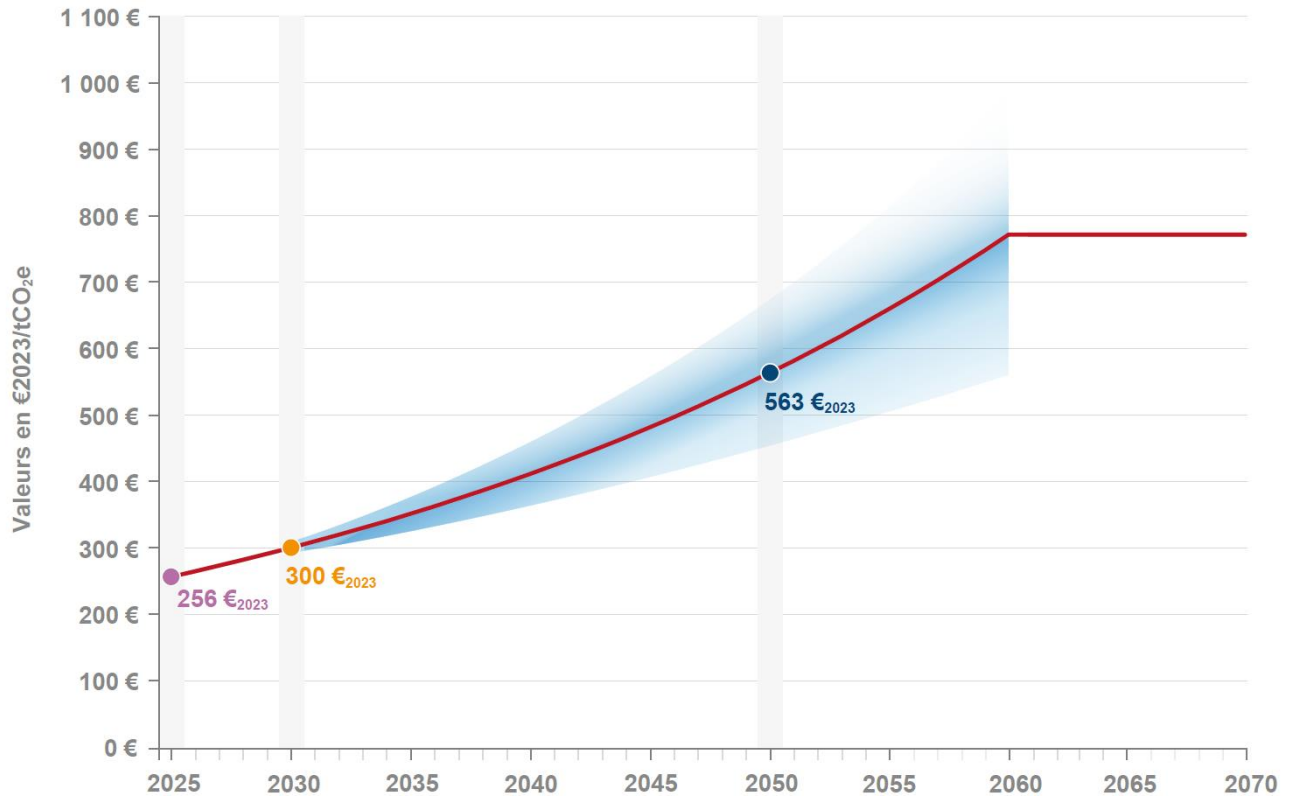
La délibération collective au sein de la commission, la variété des modèles utilisés et des simulations réalisées, les éléments de benchmarks mobilisés permettent de prendre la mesure des incertitudes, de les « objectiver », en évitant les biais liés à une modélisation spécifique. L'impact potentiel de ces incertitudes sur les ajustements futurs de la valeur de l'action pour le climat est illustré qualitativement ici par un cône, croissant dans le temps, encadrant la trajectoire de référence retenue (dans une fourchette de plus ou 150 euros à l'horizon 2050).

Cette nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat est adossée à un ensemble de sous-jacents technologiques, résumés dans la Figure 32 page suivante présentant la chronique de déploiement de quelques grandes technologies par ordre de mérite telle que simulée par TiTAN, en cohérence avec la SNBC².

¹ La valeur pour 2030 est réévaluée sous l'effet principalement de l'inflation (les 250 €₂₀₁₈ deviennent 279 €₂₀₂₃).

² Le coût prospectif des technologies d'abattement fait l'objet d'un complément au rapport (voir [Annexe 4](#)).

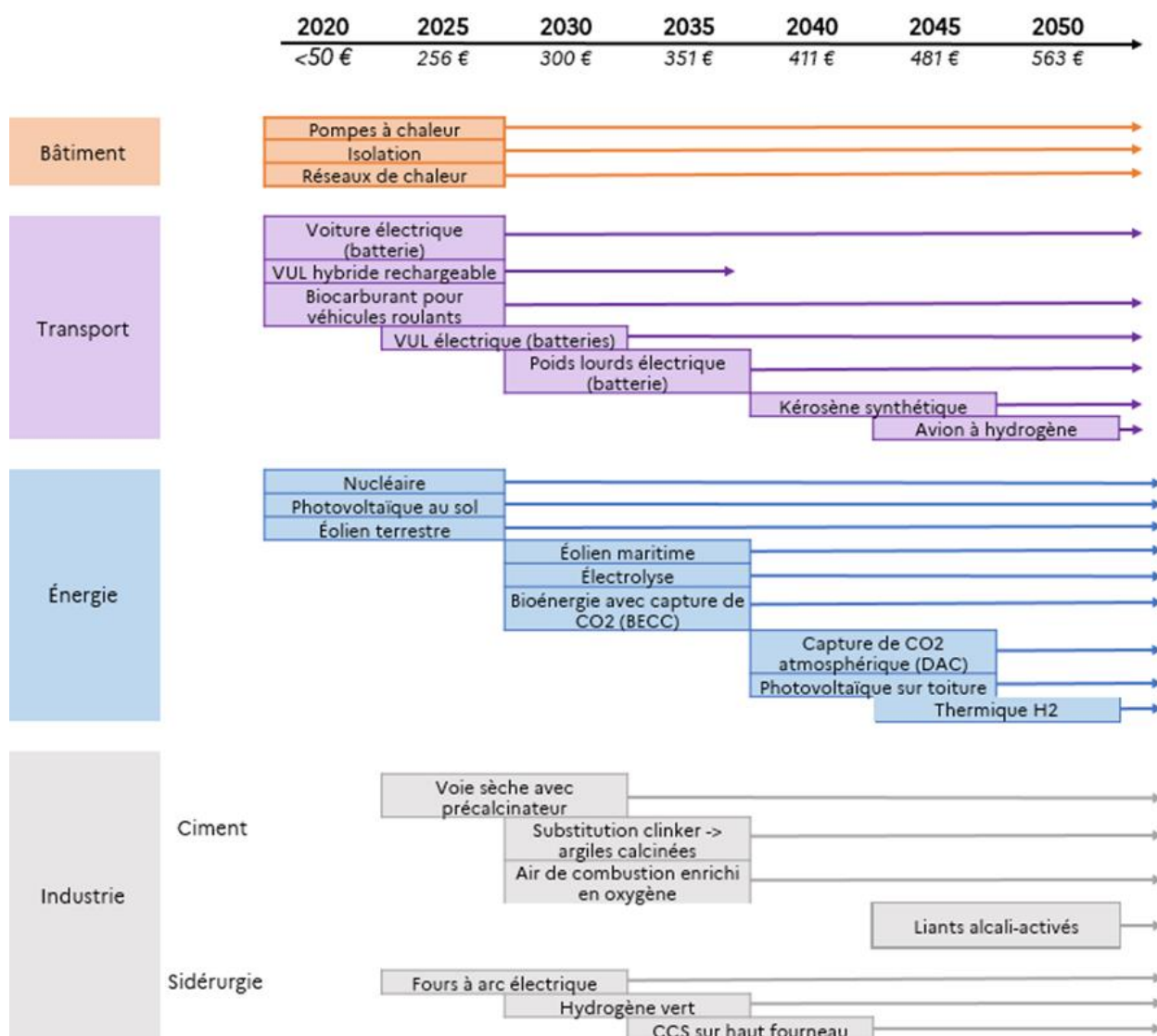
Graphique 31 – La nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat retenue par la commission (en euros₂₀₂₃/tCO₂e)



Lecture : le « cône » encadrant la trajectoire traduit qualitativement les ajustements futurs possibles de la valeur de l'action pour le climat dans le temps, compte tenu de l'évolution des connaissances et des informations disponibles.

Source : commission

Graphique 32 – Chronique du déploiement d'une sélection de technologies de décarbonation selon la nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat, modélisée dans TiTAN



Lecture : la chronique du déploiement des technologies est tirée d'une simulation du modèle TiTAN, sans contrainte carbone mais avec une trajectoire de prix exogène des émissions de GES correspondant à la proposition de nouvelle VAC. Par exemple, la production de kérosène synthétique commence en 2040 (boîte), lorsque la valeur de l'action pour le climat atteint 411 €₂₀₂₃/tCO₂e et se poursuit (flèche) jusqu'à la fin de la simulation en 2060.

Notes : voie sèche avec précalcinateur = procédé où le calcaire est partiellement chauffé avant d'entrer dans le four cimentier ; substitution du clinker par des argiles calcinées = la matière première du ciment (clinker) est remplacée par des argiles calcinées, éliminant les émissions de CO₂ liées à la fabrication de clinker et réduisant la consommation d'énergie ; liants alcalis-activés = procédé utilisant les déchets issus de l'industrie sidérurgique (laitier de haut-fourneau) pour réduire le besoin en matière première (clinker) ; CCS sur haut-fourneau : capture et stockage du carbone.

Source : commission, CGDD : modèle TiTAN

5.3. La prolongation de la trajectoire retenue par la commission après 2050

L'objectif ZEN n'est soutenable dans la durée – comme tout ce rapport vise à l'illustrer – que si l'on aura su en créer les conditions bien avant 2050. Atteindre ZEN au dernier moment par un coup de frein sur la croissance ne garantit pas la soutenabilité du résultat. À l'inverse, avoir investi dans les technologies bas carbone et les changements de comportement offre des garanties de pérennité.

Alors que l'horizon 2050 se rapproche aujourd'hui à grands pas, la question de l'évolution de la trajectoire au-delà de cet horizon se pose désormais avec acuité pour pouvoir évaluer les actions de long terme dont la durée de vie dépasse 2050.

- À l'horizon 2050 il n'est possible de décarboner l'économie française qu'en mobilisant des technologies plus coûteuses que celles fondées sur les énergies fossiles. Il serait imprudent de considérer aujourd'hui qu'une technologie de rupture viendra par miracle réduire ce surcoût peu de temps après.
- Même si le coût des énergies décarbonées baisse fortement, il faudra de toute façon avoir recours au stockage pour éliminer les émissions incompressibles. Or, la capacité d'absorption des puits ne pourra pas être élargie de manière décisive.
 - le potentiel des puits naturels est limité à un double titre : on ne peut pas étendre de manière très importante la taille des forêts car les sols doivent aussi être réservés à d'autres usages (y compris la production de bois-énergie). Les puits forestiers sont par ailleurs fragiles et ne constituent donc pas une source de stockage permanent ;
 - les puits technologiques représentent des solutions pérennes, mais coûteuses, énergivores et soumises aux limites des capacités de stockage géologiques.

Dans un tel contexte, la trajectoire est encadrée par deux considérations fondamentales :

- le budget carbone encore à la disposition de l'économie française étant épuisé, la règle de Hotelling optimisant la consommation de ce budget n'a plus lieu d'être. Concrètement, il n'y a pas de raison de faire croître la valeur de l'action pour le climat année après année au taux d'actualisation socioéconomique, en la poussant à des niveaux qui seraient sans rapport avec l'écart de coût entre solutions décarbonées et carbonées ;
- pour tenir ZEN dans la durée, il est important de garder une valeur de l'action pour le climat positive pour tenir compte de la concurrence persistante d'énergies fossiles abondantes et peu chères. Les énergies décarbonées resteront, même une fois l'objectif ZEN atteint, soumises à la concurrence des énergies fossiles, dans un contexte où la

demande globale d'énergie devrait continuer de croître. Une valeur de l'action pour le climat positive permet d'assurer la rentabilité des technologies de stockage permanent.

La commission a fait deux choix à l'intérieur de cette large fourchette :

- le premier est de continuer de faire croître la valeur de l'action pour le climat au taux d'actualisation jusqu'en 2060. Ce choix de transition a pour but de sécuriser la rentabilité des investissements bas-carbone de long terme engagés avant 2050 et portant encore en 2050 une valeur résiduelle ;
- le second choix est de maintenir la valeur de l'action pour le climat constante à compter de 2060. Ce choix suppose que les écarts de coûts entre les technologies polluantes et bas carbone restent stables, de même que le prix des énergies fossiles. Il suppose également que les émissions résiduelles incompressibles sont absorbées de manière permanente par des puits technologiques.

Cette hypothèse de stabilité est à la fois raisonnable et simple. Il est naturellement possible de concevoir d'autres profils d'évolution : on peut par exemple concevoir un profil de la valeur de l'action pour le climat décroissant dans un monde où le progrès technique « vert » serait vigoureux et permettrait au coût des technologies décarbonées de se rapprocher de celui des technologies carbonées. On peut alternativement concevoir, dans une lecture plus pessimiste des évolutions technologiques, un monde sans capacité de stockage pérenne qui justifierait alors une croissance de la valeur de l'action pour le climat, à un niveau toutefois inférieur au taux d'actualisation¹.

RECOMMANDATION DE LA COMMISSION

Officialiser la trajectoire proposée de la valeur de l'action pour le climat pour permettre à tous les acteurs de la société – État, collectivités territoriales, régulateurs sectoriels en charge des secteurs clés de la décarbonation, mais également entreprises, organisations non gouvernementales, *think tanks*, etc. – de disposer d'une référence commune et cohérente avec la SNBC 3.

¹ Le prolongement de la valeur de l'action pour le climat après 2050 fait l'objet d'un complément au rapport (voir [Annexe 4](#)).



CHAPITRE 3

LES USAGES DE LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

La trajectoire de la valeur de l'action pour le climat (VAC) est une référence que l'État et la société se donnent pour évaluer et concevoir les actions de décarbonation. Elle permet d'éclairer les choix publics, qu'il s'agisse de projets d'investissements, de programmes, de mesures : c'est sa mission « historique ».

La valeur de l'action pour le climat prend progressivement une portée plus générale, en accompagnant un certain nombre de choix privés. Dans cette seconde et nouvelle perspective, elle aide certaines entreprises à « opérationnaliser » leurs responsabilités sociétale et environnementale et nourrit les réflexions et actions d'un certain nombre de *think tanks* et organisations non gouvernementales. Ces premiers usages sociétaux sont à encourager. La valeur de l'action pour le climat permet à tous les acteurs engagés dans la décarbonation – partenaires économiques et sociaux, *think tanks*, organisations non gouvernementales et chercheurs) de disposer d'une référence commune pour évaluer les chemins possibles d'une transition juste et efficace.

1. Les usages publics de la valeur de l'action pour le climat

La valeur de l'action pour le climat constitue la référence pour évaluer la contribution des projets, actions et mesures aux objectifs de décarbonation. Elle s'inscrit à ce titre dans un dispositif d'évaluation socioéconomique éprouvé – comportant valeurs tutélaires, système d'actualisation analyse des risques et des effets redistributifs –, dont l'usage doit être systématisé.

1.1. L'analyse de la rentabilité socioéconomique des investissements publics

L'évaluation socioéconomique des investissements publics aujourd'hui en vigueur est le fruit d'une longue tradition française de calcul économique. Elle se distingue des calculs financiers habituels en adoptant la conception la plus large possible des gains d'un projet pour la collectivité que ceux-ci soient marchands ou non marchands (émissions abattues, vies sauvées, temps gagné, pollution évitée).

Dans ce cadre, la valeur actuelle nette (VAN) socioéconomique mesure les gains et les coûts pour la collectivité sur un horizon de long terme et les actualise à un taux public sans risque fondé sur une préférence normative pour le présent et une appréciation des perspectives de croissance et des risques macroéconomiques. À ce taux vient s'ajouter une prime de risque, pour tenir compte du risque non diversifiable présent dans les bénéfices du projet.

Le contexte juridique de la mobilisation de la valeur de l'action pour le climat pour les projets d'investissement public

Aujourd'hui, tous les porteurs de projets d'investissement civils financés par l'État, ses établissements publics, les établissements publics de santé ou les structures de coopération sanitaire sont soumis à l'obligation légale de réaliser une évaluation socioéconomique préalable¹. En outre, dès lors que le financement public dépasse 20 millions d'euros, le projet doit être déclaré à l'inventaire des projets d'investissement tenu par le secrétariat général pour l'investissement (SGPI). Pour les projets excédant 100 millions d'euros de financement public, le SGPI fait réaliser une contre-expertise indépendante et émet un avis transmis au Parlement et au Premier ministre. Les projets portés par les collectivités territoriales, pour leur part, ne sont pas soumis à l'obligation d'évaluation socioéconomique.

France Stratégie assure le secrétariat du conseil scientifique des méthodes d'évaluation socioéconomique, garant de l'élaboration et de la mise à jour de la méthodologie générale d'élaboration de ces évaluations. La dernière version du guide méthodologique, publié en 2023², présente les étapes de construction de la VAN socioéconomique d'un investissement, et ses différentes composantes (marchandes d'une part et non marchandes d'autre part, dont fait partie la valorisation des émissions de CO₂) (voir Encadré 9).

¹ Article 17 de la loi du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques 2012-2017.

² France Stratégie (2023), *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*, rédigé sous l'autorité du comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics présidé par Robert Guesnerie.

Encadré 9 – La valeur actuelle nette socioéconomique des projets d'investissement

De manière simplifiée¹ et en isolant la composante « émissions de gaz à effet de serre », la valeur actuelle nette socioéconomique s'écrit :

$$VAN = -I + \sum_i \left(\frac{\Delta gains_i - \Delta coûts_i}{(1+r)^i} \right) + \sum_i \left(\frac{\Delta E_i * VAC}{(1+r)^i} \right)$$

Avec :

- I l'investissement initial ;
- $\Delta gains_i - \Delta coûts_i$ le gain net hors impact carbone comparé à l'option de référence (situation sans projet) ;
- ΔE_i les moindres émissions de gaz à effet de serre l'année i , en différentiel à l'option de référence. Sans entrer dans une analyse en cycle de vie complète, il est utile pour évaluer la rentabilité carbone des projets de vérifier que les émissions émises en phase de construction soient gagées par les baisses d'émissions attendues à la mise en service ;
- VAC la valeur de l'action pour le climat à l'année i ;
- r le taux d'actualisation public retenu pour les évaluations socioéconomiques. On fait ici l'hypothèse simplificatrice d'un taux d'actualisation unique. Il convient en pratique de différencier les taux selon les impacts que l'on veut actualiser.

Une VAN positive indique que le projet est socioéconomiquement rentable, c'est-à-dire qu'il est créateur de valeur pour la société. Mais il convient de garder en tête les deux éléments de précaution suivants :

- le fait que la mise en œuvre d'un projet soit préférable au contrefactuel n'empêche pas qu'il puisse y avoir un autre projet encore meilleur. Il faut s'assurer que l'on regarde bien les différentes options de projet par rapport à l'option de référence pour avoir une hiérarchie pertinente des différentes options disponibles ;

¹ En particulier, sans tenir compte de la valeur résiduelle de l'investissement et en supposant que l'année d'actualisation est l'année de début des travaux. Les dépenses publiques tiennent compte du coût d'opportunité des fonds publics (COFP).

- par ailleurs, une VAN positive ne signifie pas nécessairement une VAN optimale. La VAN ne renseigne pas en effet sur la date optimale de mise en service du projet : même si le projet apporte dès à présent des bénéfices, il peut être encore plus rentable de le réaliser plus tard. La VAN doit donc être systématiquement complétée d'un calcul de date optimale de mise en service – celle à partir de laquelle les avantages nets couvrent la rémunération de l'investissement (voir Encadré 10).

Encadré 10 – Détermination de la date optimale de mise en service

La date optimale de mise en service d'un investissement et les principes de sa détermination peuvent être appréhendés à partir de l'exemple simple ci-dessous :

En raisonnant en temps continu, et en appelant :

- θ l'année de mise en service ;
- t l'année courante ;
- $a(t, \theta)$ l'avantage à l'année t lorsque la mise en service est à l'année θ ;
- I le coût de l'investissement ;
- r le taux d'actualisation ;
- $VAN(\theta)$ la VAN du projet supposé mis en service à la date θ .

On a :

$$VAN(\theta) = \int_{t=\theta}^{\infty} a(t, \theta) \exp(-rt) dt - I \exp(-r\theta)$$

Si la fonction $a(\)$ ne dépend pas de θ et est croissante avec t , alors le maximum de la VAN est obtenu pour θ vérifiant :

$$a(\theta) = rI$$

Illustration de l'usage de la valeur de l'action pour le climat dans l'évaluation des projets d'infrastructures de transports

Dans le secteur des transports, un référentiel d'évaluation des projets, élaboré par la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM), décline les principes du guide méthodologique de France Stratégie et précise les règles d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre auxquelles s'applique la valeur de l'action pour le climat. Les émissions nettes du projet sont estimées, sur la base du

référentiel existant, par rapport au scénario AMS (avec mesures existantes) de la SNBC – ce qui revient à évaluer le projet dans un contexte de transition réussie du secteur des transports. Une comparaison au scénario AME est menée en analyse de sensibilité. Outre les externalités climatiques (abordées sous l'angle des émissions de gaz à effet de serre), d'autres effets sont valorisés dans le cadre de l'évaluation socioéconomique, monétarisés et intégrés dans la VAN socioéconomique du projet : le temps passé dans les transports – qui joue un rôle prépondérant dans les résultats, le confort, la sécurité, la pollution atmosphérique, la congestion, le bruit... Un exemple d'analyse coûts-bénéfices dans le cadre d'un projet ferroviaire est proposé dans l'Encadré 11.

Encadré 11 – Exemple d'analyse coûts-bénéfices pour un projet ferroviaire

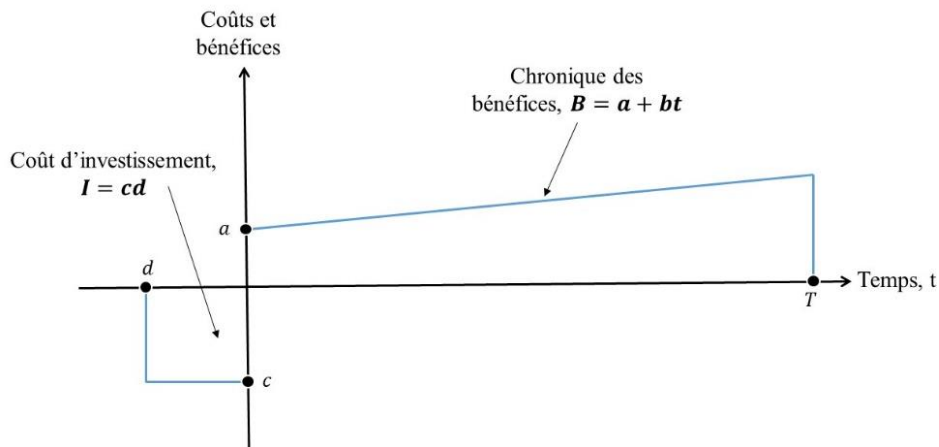
Supposons qu'un investissement se caractérise par :

- un coût d'investissement noté I avec $I = cd$;
- une chronique de bénéfices pour les voyageurs (gains de temps) supposés croître de façon linéaire avec le temps, soit $B = a + bt$.

La chronique de *cash-flows* socioéconomiques de l'investissement peut être représentée comme dans le Graphique 32.

On peut ensuite valoriser le bénéfice carbone du projet. L'investissement permet en effet de reporter certains voyageurs d'un mode polluant vers un mode bas carbone. L'expérience montre que les voyageurs reportés d'un mode polluant vers le mode bas carbone ne représentent qu'une proportion des nouveaux voyageurs après la mise en service de la nouvelle infrastructure. Il existe par ailleurs une induction de trafic, c'est-à-dire l'apparition de nouveaux voyageurs qui ne l'auraient pas fait sans le projet – un exemple d'effet rebond.

Graphique 33 – Chronique de *cash-flows* socioéconomiques



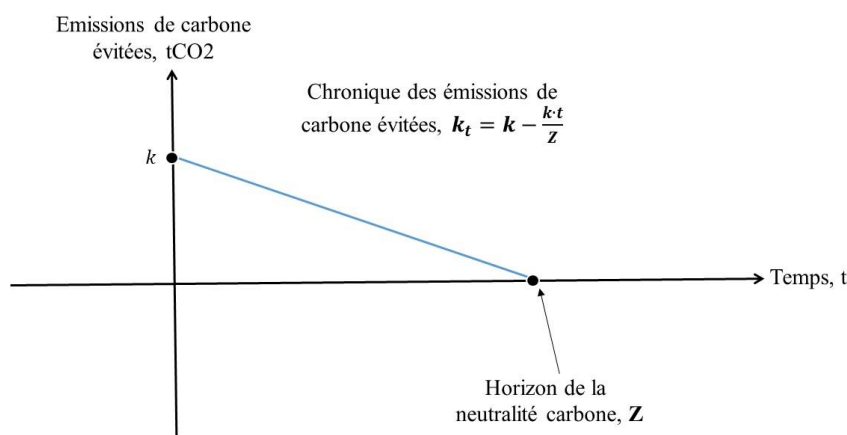
Lecture : à la date initiale du projet, un investissement I est réalisé. Il génère ensuite des bénéfices dans le temps, représenté par la courbe B .

Source : *commission*

Le volume de carbone évité par le projet pour l'année de mise en service peut ainsi s'écrire : $k = (1 - \delta) \cdot \Delta Q \cdot F$ avec F le facteur d'émission du déplacement avec un mode carboné, ΔQ l'augmentation du nombre de voyageurs et δ le taux de voyageurs induits.

Sous l'effet de la transition, le facteur d'émission du mode polluant baisse entre la première année de l'évaluation jusqu'à devenir très faible ou nul l'année de la neutralité carbone notée Z (voir Graphique 33). En supposant une baisse linéaire du facteur d'émission, on a, pour l'année t , un volume d'émission de carbone évité égal à : $k_t = k - \frac{k \cdot t}{Z}$.

Graphique 34 – Chronique des émissions évitées



Source : commission

La VAN socioéconomique du projet d'investissement est donnée par :

$$VAN = \int_{-d}^0 c e^{-rt} dt + \int_0^N (a + bt) e^{-rt} dt + \int_0^Z \left(k - \frac{k}{Z} t \right) V e^{(g-r)t} dt$$

avec r le taux d'actualisation public, N la durée de l'évaluation, V la valeur de l'action pour le climat à la mise en service de l'infrastructure et g le taux de croissance de la valeur de l'action pour le climat.

Pour simplifier la suite des calculs, on ignore le surplus des producteurs (entreprises de transports) et on suppose une actualisation étendue à l'infini, ce qui est sans conséquence sur le résultat qui nous intéresse en raison du faible poids des horizons éloignés et de la convergence des fonctions intégrales.

En supposant que la valeur de l'action pour le climat suit la règle de Hotelling, la VAN s'écrit alors : $VAN = \frac{c}{r}(1 - e^{rd}) + \frac{a}{r} + \frac{b}{r^2} + \frac{1}{2}VkZ$ où le premier terme représente le coût de l'investissement, les deux termes qui suivent la valeur du projet pour les voyageurs, et le dernier terme le bénéfice carbone du projet.

On peut calibrer cette équation en prenant le cas d'un projet ferroviaire qui serait mis en service en 2030 et se caractérisant par :

- un investissement de 4 milliards d'euros et une durée de travaux de quatre ans,
- un gain de temps d'une demi-heure pour les voyageurs,
- une demande de voyageurs de 15 millions de voyageurs par an sans investissement,
- un gain de trafic de 3 millions de voyageurs.

En prenant une valeur tutélaire des gains de temps supposée égale à 25 euros par heure gagnée, le bénéfice des voyageurs à la mise en service est égal à 208 millions d'euros, se décomposant entre le gain des anciens voyageurs pour 188 millions d'euros et le gain des nouveaux voyageurs pour 12,5 millions d'euros.

En supposant un facteur d'émission unitaire de 80 gCO₂ par voyageur-km et un déplacement moyen de 400 km (soit $F = 55 \times 400 = 32000$), nous pouvons évaluer les émissions de carbone évitées par le projet à l'année de mise en service à 72 000 tCO₂ – formellement, nous avons $k = (1 - \delta) \cdot \Delta Q \cdot F = (1 - 25\%) \times 3 \times 32000 = 72000$.

Nous pouvons en déduire la VAN socioéconomique du projet en prenant :

- un taux d'actualisation public de 3,2 % ;
- une croissance du bénéfice des voyageurs de 3 millions d'euros par an (le paramètre b) ;
- une VAC de 300 €/tCO₂ en 2030 ;
- l'année 2050 pour horizon de la neutralité carbone (d'où l'on tire $Z = 20$ ans).

Dans ces circonstances, la VAN socioéconomique du projet serait égale à 5,4 milliards d'euros que l'on peut décomposer en trois postes :

- le coût actualisé de l'investissement (-4,27 milliards d'euros) ;
- le bénéfice des voyageurs (9,47 milliards d'euros) ;
- le bénéfice carbone (0,22 milliard d'euros).

Dans cet exemple, le gain carbone représente 5 % des coûts d'investissement.

Cet exemple illustre le fait que le bénéfice carbone ne peut justifier à lui seul un programme d'investissement dans de nouvelles lignes ferroviaires. La pertinence de ces investissements pour la société repose sur d'autres co-bénéfices apportés à la société, notamment des gains de temps pour les voyageurs.

Ce résultat s'explique aussi par la proximité de l'horizon de neutralité carbone : le projet d'investissement est mis en service en 2030 et les mobilités sont supposées neutres en émissions de carbone après 2050. La simulation présentée dans le Tableau 20, montre que si l'horizon de neutralité carbone s'éloigne, le poids du bénéfice carbone augmente : il représente 10 % du coût d'investissement dans un scénario de neutralité carbone en 2070 – hypothèse du scénario AME de la SNBC.

**Tableau 20 – Poids du gain carbone
en fonction de l'horizon de neutralité carbone**

Horizon de la neutralité carbone	2050	2060	2070	2080
Poids du gain carbone en % du coût d'investissement	5,10 %	7,60 %	10,10 %	12,70 %

Source : commission

L'enjeu du scénario de référence

Le cadre analytique

Dans le domaine de l'évaluation des projets d'investissements publics, notamment dans le domaine des transports et de l'énergie, la question de ce que serait la situation à moyen terme en l'absence de projet – du contrefactuel – est cruciale.

- Le scénario de référence est un cadrage général qui doit être le même pour tous les projets. Il doit décrire l'évolution de la population, le contexte macroéconomique et l'état de l'environnement sur un horizon de long terme, cohérent avec la durée de vie des projets. On mesure d'emblée la difficulté de l'exercice, compte tenu des grandes incertitudes pesant sur les évolutions de la productivité, des technologies, des comportements et de la politique économique à long terme.
- Une fois le scénario de référence déterminé, il faut décrire l'option de référence. Il s'agit de l'alternative qui prévaudrait le plus probablement en l'absence de réalisation du projet évalué. Ce n'est pas *a priori* une alternative où il ne se passe rien : dans le cas des infrastructures de transport, elle peut comprendre par exemple la régénération de l'infrastructure en service ou les investissements en d'autres modes de transport. En toute logique, l'option de référence devrait être redéfinie quand on change de scénario de référence. Par exemple, elle n'a aucune raison d'être la même si le scénario de référence est le « fil de l'eau » ou si c'est la SNBC. Par rapport au « fil de l'eau », un projet de transport public permettra de diminuer le recours à la voiture thermique ; par rapport à la SNBC c'est le recours à la voiture électrique qu'il remplacera en partie.
- Une fois l'option de référence déterminée, il s'agit d'évaluer la valeur du projet en termes de décarbonation par rapport à l'option de référence. Pour cela, il faut évaluer les réductions d'émissions de CO₂ permises par le projet et les valoriser à l'aide de la valeur de l'action pour le climat.

Les référentiels actuels

Pour la réalisation des évaluations de projets de transport, les référentiels actuels recommandent au maître d'ouvrage d'utiliser le scénario AMS de la SNBC comme scénario de référence. Ce scénario suppose notamment que le secteur des transports réussit à faire sa transition écologique. Un test de sensibilité à partir du scénario AME doit par ailleurs être effectué pour apprécier la contribution du projet aux objectifs climatiques dans un cadrage moins favorable à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

On peut argumenter que le choix de la SNBC comme scénario de référence est un bon choix pour trois raisons : prendre explicitement en compte l'incertitude sur l'évolution future de l'économie est techniquement complexe ; la SNBC, inscrite dans la loi, représente le futur désirable ; la valeur de l'action pour le climat est calculée en cohérence avec ce scénario.

Il faut cependant reconnaître que les écarts entre un scénario AMS et un scénario AME ou « au fil de l'eau » sont importants et on ne peut considérer comme acquises les mesures supplémentaires nécessaires mais non décidées. Ces écarts ont un fort impact sur la valeur actuelle nette socioéconomique des projets : dans la mesure où la mobilité actuelle est aujourd'hui faiblement décarbonée, les bénéfices en termes d'émissions de carbone d'un projet d'infrastructure de transport se substituant à une option de référence décarbonée (la voiture électrique par exemple) seront bien moindres que si l'option de référence est carbonée (la voiture thermique).

En l'état actuel de l'art, les niveaux de la valeur de l'action pour le climat sont élevés à l'horizon 2050 mais cette valorisation potentiellement favorable est largement émoussée par le choix d'une référence postulant l'atteinte de l'objectif ZEN, alors même que toutes les mesures nécessaires pour l'atteindre ne sont pas encore décidées ou consolidées.

La question de la référence se pose avec encore plus d'acuité après 2050, une fois le ZEN atteint. Un projet d'investissement bas carbone, soit pour développer un nouvel actif, soit pour régénérer un actif existant en fin de vie (une ligne de chemin de fer, une centrale nucléaire, etc.) doit être correctement valorisé, dans la mesure où sa non-réalisation peut rendre possible le retour aux énergies fossiles et nécessiter ensuite un stockage coûteux du carbone.

Il convient donc d'éclairer par quelle méthodologie socioéconomique on évalue la contribution d'un investissement bas carbone à la transition écologique et au respect de l'objectif ZEN dans la durée.

Axes de travail pour progresser dans l'évaluation de long terme

Une première manière de prendre en compte la contribution d'un projet à la décarbonation est de l'évaluer par rapport à différents scénarios « SNBC dégradée », dans lequel l'objectif de décarbonation est atteint de manière plus progressive ou différée dans le temps.

La Banque de France, par exemple, effectue ce type d'exercice pour quantifier les impacts de la transition énergétique sur les variables économiques et financières nécessaires à l'évaluation des risques financiers¹. Le scénario de référence central est celui du réseau des banques centrales et des superviseurs pour le verdissement du système financier (NGFS), décrivant une « transition ordonnée » vers une économie bas carbone. Deux scénarios dégradés sont considérés par ailleurs, représentant deux cas différents de transition désordonnée : une « transition retardée » qui ne serait mise en œuvre qu'à partir de 2030 et nécessiterait une révision brutale de la politique climatique, et une « transition rapide et brutale », qui commencerait en 2025, mais comporterait un progrès technique et une croissance de la productivité plus faibles que dans le scénario central.

Une autre manière de prendre en compte la contribution d'un projet à la décarbonation consiste à valoriser le fait qu'il apporte une contribution certaine à la SNBC. Autrement dit, si la réalisation de la SNBC est incertaine, la valeur du projet est augmentée du fait qu'il permet des réductions d'émissions certaines, à comparer avec les réductions incertaines prévues dans la SNBC. Le projet a ainsi une valeur assurancielle. La méthodologie permettant de l'évaluer reste à préciser, en s'appuyant sur les rapports de France Stratégie concernant la prise en compte des risques dans l'évaluation des projets².

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

Pour l'évaluation des investissements publics :

- inscrire la nouvelle valeur de l'action pour le climat dans les référentiels d'évaluation socioéconomique des investissements publics ;
- utiliser la valeur de l'action pour le climat pour pleinement valoriser les gains carbone que les projets bas carbone recèlent – soit que ceux-ci permettent d'abattre des émissions existantes, soit qu'ils permettent de « sécuriser » dans la durée les solutions décarbonées et d'éviter ainsi le retour toujours possible des énergies fossiles ;
- préciser la valorisation des projets dont l'impact n'est pas permanent, notamment ceux portant sur les puits forestiers, pour tenir compte à la fois des temps de régénération des forêts ou des risques de destructions (incendies, tempêtes, maladies, etc.).

¹ Allen T., Dees S., Boissinot J., Mateo Caicedo Graciano C., Chouard V., Clerc L., de Gaye A., Devulder A., Diot S., Lisack N., Pegoraro F., Rabaté M., Svartzman R. et Vernet L. (2020), « [Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: an Application to France](#) », Working Paper n° 774, Banque de France, juillet.

² Centre d'analyse stratégique (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, rapport de la mission présidée par Christian Gollier, Paris, La Documentation française ; France Stratégie (2023), *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*, op. cit.

1.2. La comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat

Au-delà des investissements publics, nombre d'actions, pouvant prendre la forme de programmes (de rénovation énergétique des bâtiments, d'électrification du parc de véhicules, etc.) ou de gestes plus circonscrits (isolation des combles, changement du système de chauffage, etc.) contribuant à la mise en œuvre de la SNBC. Pour ces actions, l'instrument de mesure de référence est le coût d'abattement – indicateur intensif qui détermine le surcoût collectif à consentir pour obtenir un bénéfice climatique unitaire, là où la VAN est un indicateur extensif qui mesure la valeur supplémentaire créée par un investissement.

Les principes des coûts d'abattement socioéconomiques

Le coût d'abattement se définit comme 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 (voir Encadré 12). L'écart de coût est actualisé car le coût d'abattement intègre les coûts liés à l'investissement initial, mais aussi le différentiel de coûts liés à l'usage de cet actif tout au long de sa durée de vie¹. Ainsi le remplacement d'un véhicule conventionnel par un véhicule électrique conduit à des coûts d'investissement et de fonctionnement différents, que l'on peut rapporter à la différence dans les émissions.

Encadré 12 – Calcul du coût d'abattement

De façon formelle, on peut écrire ce coût d'abattement de la manière suivante :

$$CA = \frac{I + \sum_i \Delta C_i / (1 + r)^i - \sum_i \Delta C B_i / (1 + r)^i}{\Delta E_2}$$

avec :

– I le surcoût des acquisitions/travaux nécessaires pour mettre en œuvre une solution décarbonée (en euros) ;

¹ Cela implique dans cette optique, en théorie, d'intégrer également les émissions à l'étranger (par exemple, les émissions liées à la production des batteries pour les véhicules électriques) – bien qu'il n'y ait pas de prérogative spécifique au sujet.

- ΔC_i le surcoût annuel de la solution décarbonée par rapport à la solution de référence polluante ;
- ΔCB_i les co-bénéfices annuels de la solution décarbonée ;
- r le taux d'actualisation ;
- ΔE_2 le volume d'émissions de gaz à effet de serre évitée durant l'ensemble de la durée de vie technique de la solution.

Le coût d'abattement considéré pour l'action publique est un coût d'abattement socio-économique, c'est-à-dire du point de vue de la société dans son ensemble. Il se distingue donc d'un coût d'abattement financier que peut calculer un agent économique privé. Cette perspective socioéconomique implique :

- de calculer le coût d'abattement d'une action de décarbonation net des co-bénéfices que l'action génère, notamment les gains liés à la santé. Le coût d'abattement d'une action de rénovation thermique dans le bâtiment doit par exemple s'évaluer net des gains sanitaires générés. En d'autres termes, le coût d'abattement de cette action de rénovation vu par la collectivité sera plus faible que ce coût vu par le propriétaire qui réalise les travaux ;
- d'actualiser les coûts et gains au taux d'actualisation socioéconomique – et non au taux des marchés financiers ou à tout autre proxy d'un taux d'actualisation privé ;
- de considérer le coût hors taxes et subventions, dans la mesure où celles-ci représentent des transferts monétaires au sein de la collectivité, sans incidence nette sur le bilan socioéconomique de l'investissement, au coût d'opportunité des fonds publics (COFP)¹ près.

Comme le montre l'Encadré 13 ci-dessous, l'approche en coût d'abattement socio-économique relève de la même logique que l'approche en VAN socioéconomique d'un projet d'investissement.

L'évaluation des différents gisements d'abattement permet de construire un ordre de mérite qui peut être représenté par les coûts marginaux d'abattement croissants². En première

¹ Le COFP prend en compte les effets de distorsion sur l'économie des prélèvements nouveaux nécessaires pour compenser des pertes de recettes fiscales.

² Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et de Gouvello C. (2014), « [Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil](#) », Policy Research Working Paper, n° WPS 6808, World Bank Group, mars.

analyse, toute action de décarbonation dont le coût d'abattement est inférieur à la valeur de l'action pour le climat est socioéconomiquement rentable (voir Graphique 35).

Encadré 13 – Comparaison des coûts d'abattement socioéconomiques à la valeur de l'action pour le climat

Sous l'hypothèse d'une VAC qui croît au taux d'actualisation socioéconomique sur la durée de vie du projet étudié, on a :

$$VAN_{SE,i} = - \sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + VAC_t \times \Delta E_{i,t}}{(1+r)^t} > 0$$

$$\Leftrightarrow - \sum_{t=0}^{N-1} \frac{VAC_t \times \Delta E_{i,t}}{(1+r)^t} > \sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r)^t}$$

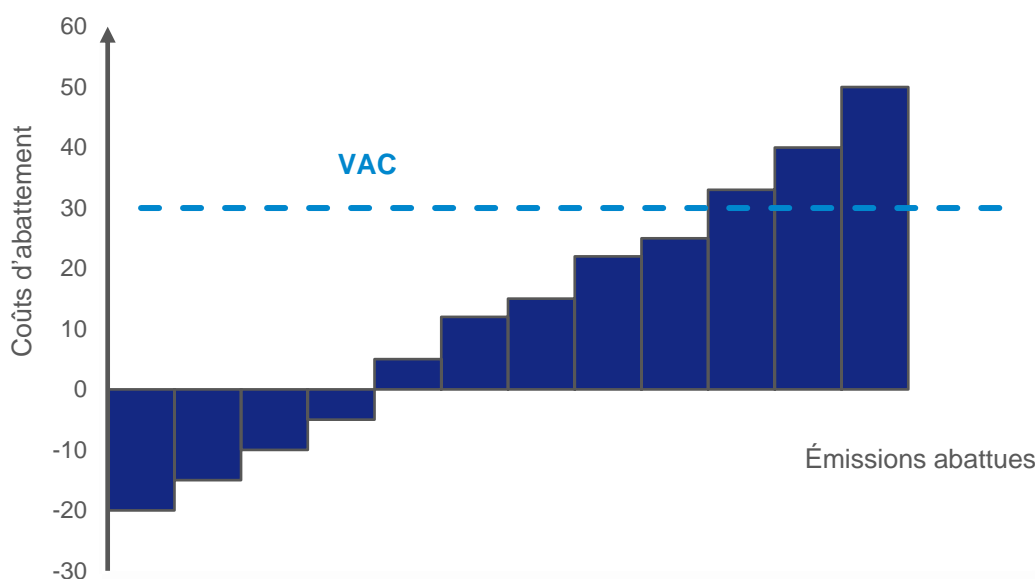
$$\Leftrightarrow - \sum_{t=0}^{N-1} VAC_0 \times \Delta E_{i,t} > \sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r)^t} \text{ si } VAC_t = VAC_0(1+r)^t$$

$$\Leftrightarrow VAC_0 > - \frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}}$$

Où :

- $VAN_{SE,i}$ est la valeur socioéconomique actualisée nette du projet i ;
- C_i est le coût d'abattement du projet i ;
- VAC_t est la valeur de l'action pour le climat à la date t ;
- VAC_0 est la valeur de l'action pour le climat à la date de lancement du projet ;
- $\Delta C_{i,t}$ est le coût additionnel (somme des coûts marchands et non marchands hors externalité climatique) du projet i par rapport à l'option de référence à la date t ;
- r est le taux d'actualisation socioéconomique ;
- $\Delta E_{i,t}$ est la variation d'émissions de GES du projet i par rapport à l'option de référence à la date t.

Graphique 35 – Valeur de l'action pour le climat versus coûts d'abattement



Source : commission

Les principes de comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat

La comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat permet de définir le périmètre des actions sectorielles pertinentes à mobiliser :

- toutes les actions de décarbonation dont le coût d'abattement socioéconomique net des co-bénéfices est inférieur à la valeur de l'action pour le climat sur la durée de l'action seraient socioéconomiquement rentables pour la collectivité ;
- les autres induiraient en première approche des surcoûts par rapport à un chemin purement coût-efficace.

En pratique, cette comparaison doit être affinée pour tenir compte de deux autres dimensions importantes :

- une dimension « système ». Si l'on envisage par exemple une décarbonation complète du système électrique avec une pénétration très importante des énergies renouvelables variables, il faut prendre en compte les « coûts système » liés à la nécessité d'assurer en permanence l'adéquation offre-demande ;
- une dimension temporelle. Le coût d'abattement d'une action donnée évolue dans le temps. Une technologie peut présenter des coûts d'abattement présents trop élevés, mais des perspectives favorables si le progrès technique, les effets d'apprentissage et les économies d'échelle permettent de réduire les coûts d'abattement futurs.

Dans le même esprit, il n'est pas pertinent d'attendre d'avoir épuisé l'ensemble du potentiel des technologies présentant les coûts d'abattement les plus faibles pour investir dans l'innovation et faire baisser les coûts d'abattement futurs des technologies aujourd'hui émergentes. À l'inverse, il peut ne pas être pertinent de recourir à des technologies dont les coûts d'abattement sont inférieurs à la valeur de l'action pour le climat, lorsqu'elles présentent des risques de verrous technologiques, et donc, à terme, des coûts échoués (déploiement de véhicules hybrides, recours massif au gaz en substitution du pétrole et du charbon).

Comme la valeur de l'action pour le climat est croissante dans le temps, le progrès technique fort (et incertain), les bénéfices d'une technologie dépendent crucialement du timing dans lequel on la déploie. Pour ces différentes raisons, les coûts d'abattement doivent faire l'objet de réévaluations régulières.

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

Dans la lignée des travaux de la commission Criqui :

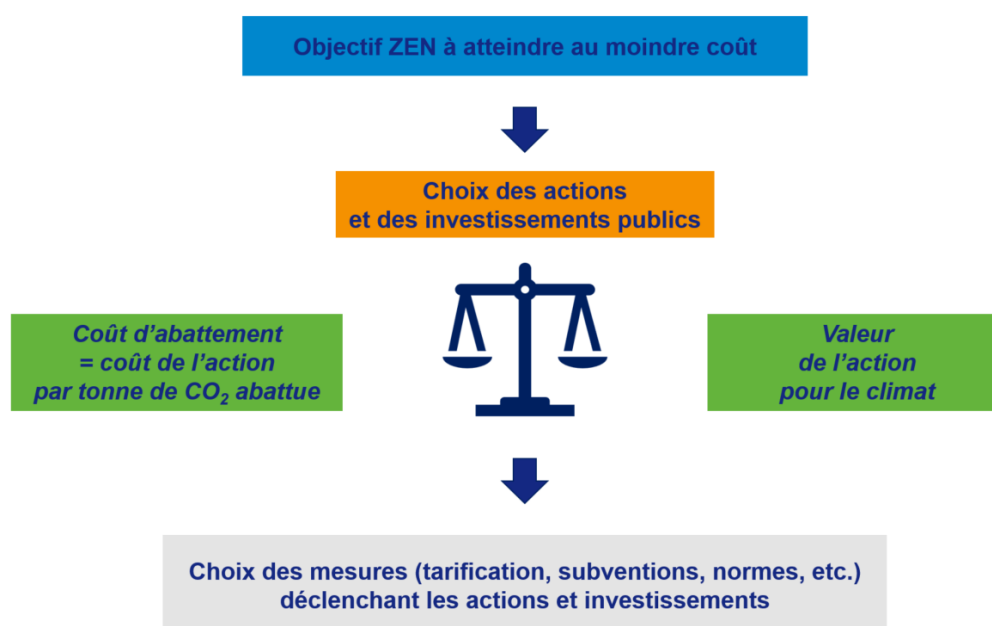
- actualiser les coûts d'abattement pour intégrer les informations nouvelles sur le coût et la disponibilité des technologies bas carbone, ainsi que sur l'évolution des comportements.
- utiliser la valeur de l'action pour le climat pour bien identifier le périmètre des actions de décarbonation utiles et nécessaires.

1.3. Le calibrage des mesures de politiques publiques

Toute action dont le coût d'abattement vu par un agent économique privé est négatif (c'est-à-dire qui rapporte de l'argent à celui qui l'entreprend) sera certainement mise en œuvre si cet agent dispose de la bonne information et, au besoin, d'un accès au crédit. Dans la plupart des cas cependant, les coûts d'abattement, qu'ils soient socioéconomiques ou privés, sont positifs, ce qui signifie que les actions sont coûteuses. Les travaux de la commission Criqui le confirment : il existe des gisements d'abattement importants de décarbonation dont le coût est inférieur à la valeur de l'action pour le climat, mais supérieur à 0.

La valeur de l'action pour le climat permet dans un premier temps de définir le périmètre des actions socioéconomiquement rentables. Il faut, dans un second temps, bien identifier et calibrer un bouquet de mesures susceptibles de déclencher ces actions (voir Schéma 1).

Schéma 1 – Enchaînement des actions et des mesures



Source : commission

Le décideur public peut ainsi orienter les choix privés via la tarification du carbone, des subventions à l'acquisition d'équipements bas carbone, des mécanismes financiers de partage de risque de développement entre public et privé, ou encore des réglementations, normes et mesures d'information.

- La tarification du carbone représente actuellement une fraction minoritaire de la valeur de l'action pour le climat, que ce soit pour les secteurs soumis au marché européen des quotas de CO₂ ou ceux assujettis à la contribution nationale climat énergie. Ainsi, la valeur de l'action pour le climat nouvellement établie atteint 256 €/tCO₂e en 2025 alors que la tarification « effective » du carbone s'élève à 91 €/tCO₂e¹ en moyenne sur les émissions françaises en 2023².
- La tarification du carbone peut être complétée par des subventions à la décarbonation, afin de fournir une incitation suffisante pour déclencher les investissements en décarbonation, ou encore par des normes. Il est alors nécessaire, mesure par mesure, d'évaluer leurs coûts (c'est-à-dire le coût à la tonne de CO₂ évitée) pour la société – qu'il

¹ Divialle J. et Fouquet M. (2024), « Une tarification des émissions de gaz à effet de serre inégale selon les secteurs », *Théma Essentiel – Climat*, CGDD, décembre.

² On inclut ici l'ensemble de la fiscalité sur les carburants, même si celle-ci contribue de fait à internaliser bien d'autres coûts externes (congestion, usure de la route, pollution de l'air, bruit et accidents notamment). Ce chiffre est donc une estimation haute de la tarification du carbone.

s'agisse du coût pour les contribuables des subventions ou du coût pour les assujettis de mise en conformité aux normes.

Les évaluations disponibles¹ suggèrent que les actions les plus efficaces reposent sur un mix d'instruments, plutôt que sur l'usage intensif d'un seul instrument. La valeur de l'action pour le climat ne préjuge pas du bon mix d'instruments, mais elle permet de s'assurer que l'ensemble des mesures prises par action sont convenablement calibrées et coûts-efficaces.

Une évaluation agrégée de l'ensemble des prix implicites des taxes, marchés de quotas, subventions, réglementations, mesures informationnelles, etc., reste un exercice complexe car les différentes mesures ne s'additionnent pas simplement : les subventions portent généralement sur l'acquisition, la tarification sur l'usage, alors que les normes peuvent concerner les deux. Par exemple, pour inciter à acquérir et utiliser un véhicule électrique plutôt qu'un véhicule thermique, il est possible de passer par des systèmes de bonus-malus, de la fiscalité sur les carburants, des restrictions de circulation², chaque mesure pouvant cibler une incitation spécifique au moment de l'acquisition ou de l'usage. Mais il est possible cependant de « muscler » l'évaluation des mesures dans deux directions.

- Procéder à des évaluations mesure par mesure. Ces évaluations réalisées sur quelques mesures par le FMI, l'OCDE ou France Stratégie, suggèrent en effet qu'il existe une très forte hétérogénéité des coûts à la tonne de CO₂ évitée : les mesures peu coûteuses coexistent avec des mesures très coûteuses (voir Tableau 21). Il est utile de systématiser ces évaluations, ce qui suppose en particulier de bien identifier les effets d'aubaine et les effets rebond.
- Procéder à une analyse multidimensionnelle de chaque mesure, en élargissant les critères d'évaluation au-delà de la seule analyse des coûts à la tonne de CO₂ évitée. Le référentiel ABCDE proposée par la Direction générale du Trésor propose ainsi une grille d'évaluation de la mise en œuvre d'une politique publique sous l'angle de cinq critères : les coûts d'abattement, les effets de bouclage, la cohérence avec la stratégie de décarbonation, la capacité à déclencher les actions attendues et les effets indirects (voir Tableau 22).

¹ Stechemesser A., Koch N., Mark E., Dilger E., Klösel P., Menicacci L., Nachtigall D., Pretis F., Ritter N., Schwarz M., Vossen H. et Wenzel A. (2024), « [Climate policies that achieved major emission reductions : Global evidence from two decades](#) », *Science*, vol. 385(6711), août, p. 884-892.

² Comme les zones à faibles émissions, ou encore des réservations de voies aux véhicules décarbonés.

Tableau 21 – Prix implicites du carbone associés à quelques mesures

Mesure	Type de mesure	Prix implicite	Source
Bonus automobile	Subvention	300 €/tCO _{2e} hors effet d'aubaine 600 €/tCO _{2e} avec effet d'aubaine 800 €/tCO _{2e} avec impact TICPE	Montout S. et Robinet A. (2024), « Le soutien au développement des véhicules électriques est-il adapté ? », <i>La Note d'analyse</i> , n° 139, France Stratégie, juin
Malus automobile	Taxe	150 €/tCO _{2e}	Vernon-Lin N. (2024), « Balancing environmental, fiscal, and welfare impacts of transportation decarbonization in France », IMF Working Paper, n° 2024/145, Fonds monétaire international, juillet
Dispositif BCIAT* du Fonds chaleur	Subvention	19 €/tCO _{2e} (hors prix ETS)	France Stratégie (2024), <i>Comité d'évaluation du plan France Relance. Rapport final</i> , janvier
Incorporation de biocarburants	Norme	271 à 541 €/tCO _{2e} en 2022	SDES (2024), <i>Bilan énergétique de la France pour 2022</i> , coll. « Data Lab – Énergie », mai

* Biomasse Chaleur pour l'Industrie, l'Agriculture et le Tertiaire.

Source : commission

Tableau 22 – Exemple de mobilisation du référentiel ABCDE

Critère	Principe	Exemple illustratif des effets à considérer pour une hypothétique subvention de soutien à la conversion de chaudières au fioul en pompes à chaleur (PAC)
Abattement	Quels sont les coûts d'abattement et le potentiel d'abattement du geste encouragé par le dispositif ?	<p>Coût d'abattement micro-fondé : calculé à partir du différentiel de coût entre PAC et chaudière à fioul domestique (investissement initial dans la PAC, différentiel de facture énergétique, différentiel de coûts de maintenance).</p> <p>Comparaison à la valeur de l'action pour le climat : un coût d'abattement micro-fondé inférieur à la VAC est un indice de la nécessité de déployer le levier dans un scénario de décarbonation coût-optimal.</p> <p>Potentiel d'abattement : différence entre les émissions induites par le chauffage au fioul et par l'électricité de la PAC, y compris effet rebond, en inventaire ou empreinte.</p>
Bouclage	Le dispositif accroît-il l'usage de ressources limitées et essentielles à la transition ?	Bouclage physique : tension supplémentaire sur la production d'électricité ¹ , notamment lors des pics de consommation en hiver.

¹ Sans couplage avec une source d'appoint, comme le bois.

Critère	Principe	Exemple illustratif des effets à considérer pour une hypothétique subvention de soutien à la conversion de chaudières au fioul en pompes à chaleur (PAC)
Cohérence	Le dispositif est-il cohérent avec la stratégie de décarbonation ?	D'autres mesures existantes ou planifiées incitent déjà à l'installation d'une PAC (par exemple MaPrimeRénov', les CEE, l'interdiction de location de passoires thermiques, la composante carbone), tandis que l'installation de nouvelle chaudière au fioul est interdite.
Déclenchement	Le dispositif permettra-t-il effectivement de déclencher les gestes attendus ?	Du fait du niveau et de la volatilité des prix du fioul, les ménages qui le peuvent pourraient choisir spontanément d'investir dans une PAC. Pour éviter un effet d'aubaine , le dispositif pourrait être ciblé en priorité sur les ménages plus modestes, pour lesquels l'additivité de la dépense publique associée pourrait être meilleure, s'ils sont davantage sujets à des défaillances de marché non climatiques .
Effets indirects	Quels sont les autres effets induits et sont-ils désirables ?	Risque de verrouillage technologique (lock-in) : peut désinciter un raccordement ultérieur à un réseau de chaleur urbain dans certaines zones denses. Autres effets indirects socioéconomiques : effets redistributifs, lutte contre la précarité énergétique, diminution des pollutions locales, confort d'été, amélioration de la balance commerciale dans le cas de PAC produites en France.

Source : adapté de DG Trésor (2023), *Rapport intermédiaire. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, décembre

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

- Établir des bilans socioéconomiques des principales mesures envisagées pour changer les comportements et encourager les investissements bas carbone, en poursuivant notamment les premiers travaux engagés de calcul des prix implicites pour les normes et les subventions.
- Compléter la valeur de l'action pour le climat d'une évaluation des enjeux de redistribution et de compétitivité – dans le cadre notamment de l'évaluation des impacts socioéconomiques de la SNBC 3 – pour aider à la définition des politiques d'accompagnement.

1.4. Une estimation agrégée des efforts climatiques

La valeur de l'action pour le climat peut permettre d'évaluer de manière agrégée les efforts à fournir pour atteindre les objectifs fixés, voire une « dette climatique ». Au-delà, elle peut être utilisée dans une comptabilité nationale « augmentée » telle que développée par l'Insee.

Des évaluations prospectives du coût des efforts

Il est possible de considérer, différentes mesures agrégées et prospectives de l'effort de décarbonation :

- le coût des investissements nécessaires à l'atteinte de ces objectifs. Le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023) sur les incidences économiques de l'action pour le climat¹ estimait ainsi à un peu plus de 2 % du PIB le surcroît annuel d'investissement requis à horizon 2030 par rapport à un scénario sans décarbonation ;
- le coût net des abattements, qui lisse le coût du capital en mesurant son coût d'usage (comprenant sa rémunération et sa dépréciation) et qui retranche à ce coût brut les économies de dépenses courantes.

La valeur de l'action pour le climat permet d'évaluer à titre illustratif un tel coût d'abattement, comme l'avaient établi Blanchard et Tirole (2021)² :

- en faisant l'hypothèse simplificatrice qu'en l'absence d'action, les émissions resteraient égales à leur niveau observé en 2023 (dernière année connue), le cumul des réductions d'émissions nécessaires entre 2025 et 2030 pour respecter la SNBC s'élèverait à 383 MtCO_{2e} ;
- en multipliant cette réduction cumulée par une VAC de 256 €/tCO_{2e}³, son coût actualisé cumulé entre 2025 et 2030 peut être estimé à 98 milliards d'euros (soit 16 milliards d'euros par an en moyenne), ce qui représente 0,6 % du PIB total sur la période. Encore faut-il considérer cette évaluation comme une borne haute, dans la mesure où la valeur de l'action pour le climat est le reflet d'un coût marginal plutôt que d'un coût moyen.

¹ France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat*, rapport à la Première ministre, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, mai.

² Blanchard O. et Tirole J. (2021), *Les grands défis économiques*, rapport de la commission internationale, juin.

³ VAC de 2025, aussi égale à la valeur actualisée en 2025 de la valeur de l'action pour le climat à toute date postérieure du fait du respect de la règle de Hotelling.

Ce coût est logiquement inférieur aux besoins d'investissement estimés dans Pisani-Ferry et Mahfouz (2023), pour deux raisons : les investissements peuvent générer des économies de dépenses opérationnelles (réduction de la facture énergétique notamment) ; ils peuvent aussi générer des co-bénéfices (gains de santé induits par la rénovation thermique ou gains de temps pour les infrastructures de transport collectif, par exemple).

Il est possible, dans le même esprit, de calculer une « dette » climatique implicite et « prospective » de la société, représentant le coût des actions permettant d'atteindre un objectif donné, ou le coût des mesures supplémentaires à décider pour atteindre cet objectif¹. La valeur de l'action pour le climat peut alors être utilisée pour valoriser ces efforts à accomplir au niveau national ou les mesures à prendre pour les induire².

Il convient de souligner que les évaluations de dette climatique utilisées dans le débat public ne peuvent pas être mises sur le même plan que la dette publique : d'abord parce qu'il n'y a juridiquement pas de créance ; ensuite par ce que l'État n'est pas le seul débiteur implicite.

Cette logique de dette climatique est à l'origine de certains contentieux, à l'instar de « L'Affaire du siècle » pour laquelle a été demandé de la part d'organisations non gouvernementales un montant d'astreinte financière à la charge de l'État (voir Encadré 14).

Encadré 14 – Les usages de la valeur de l'action pour le climat dans les contentieux

L'Affaire du siècle

« L'Affaire du siècle » est une action en justice portée par quatre organisations non gouvernementales (Notre Affaire à Tous, la Fondation pour la Nature et l'Homme - FNH, Greenpeace France et Oxfam France), mettant l'État en cause pour inaction climatique, en particulier concernant le non-respect du premier budget carbone (2015-2018) de la SNBC³. Le 14 juin 2023, les organisations de l'Affaire du siècle ont déposé un mémoire au tribunal administratif de Paris demandant au tribunal de

¹ C'est par exemple le sens de l'évaluation faite par l'Institut Avant-Garde (2024), *Dette climatique : associer les soutenabilités climatiques et budgétaires*, rapport, juin. La dette climatique fait l'objet d'un complément au rapport (voir Annexe 4).

² *Ibid.*

³ Citepa (2024), « *Affaire du siècle : même si le tribunal constate que l'Etat n'a pas complètement exécuté sa décision de 2021, il rejette la demande de mesures d'injonction* », article du 24 avril.

prononcer une astreinte financière de 1,1 milliard d'euros en mettant l'État en cause pour inaction climatique et dans le but d'obtenir réparation.

L'Affaire du siècle a mobilisé la valeur de l'action pour le climat dans le cadre de cette demande. Présentée dans ses mémoires au Tribunal administratif de Paris, cette approche consiste en la multiplication de (i) la différence entre les émissions de GES de la France et ses objectifs du premier budget carbone, (ii) le nombre de semestres d'écart entre la date de la demande de l'Affaire du siècle et la fin du premier budget carbone, et (iii) la hausse moyenne de la valeur de l'action pour le climat par semestre¹.

Le tribunal administratif de Paris a rendu un troisième jugement le 22 décembre 2023, rejetant ainsi la demande d'astreinte soumise par les quatre ONG requérantes pour assurer l'exécution du tribunal du 14 octobre 2021.

Exemple de mobilisation du coût social du carbone au Brésil

D'autres contentieux mobilisent des usages de valeurs tutélaires du carbone comme celle utilisée aujourd'hui aux États-Unis. Un éleveur de bétail brésilien a récemment été condamné à payer plus de 50 millions de dollars (39 millions de livres sterling) pour avoir détruit une partie de la forêt amazonienne et à restaurer le puits de carbone². Le tribunal a estimé que la destruction de la forêt amazonienne émettait en moyenne 161 tonnes de carbone par hectare, soit un total de 901 600 tonnes et a évalué la valeur de ces dommages à 60 euros (65 dollars ou 50 livres sterling) par tonne d'équivalent carbone. Ce coût unitaire a été obtenu en faisant la moyenne du coût social du carbone calculé par l'Agence américaine de protection de l'environnement et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

¹ Affaire du siècle (2023), « [L'Affaire du Siècle : 4 ans de procédures pour que l'Etat réponde à l'urgence climatique](#) », dossier de presse du 23 juin. Calculé sur la base d'une interpolation linéaire des valeurs de valeur de l'action pour le climat en 2018 et 2030, le taux moyen d'accroissement mobilisé par l'Affaire du siècle est de 8,17 €/tCO₂. Par soucis de simplicité, les émissions ne sont pas actualisées au taux d'actualisation socioéconomique.

² Kaminski I. (2024), « [Brazilian rancher ordered to pay \\$50m for damage to Amazon](#) », *The Guardian*, article du 25 juillet.

L'utilisation de la valeur de l'action pour le climat pour une comptabilité augmentée

Dans sa publication de novembre 2024¹, l'Insee propose des indicateurs synthétiques issus de la comptabilité nationale ajustés des coûts induits par les émissions de gaz à effet de serre. L'approche de l'Insee se distingue des précédentes approches sur deux points :

- elle considère non seulement les coûts d'abattement mais aussi les coûts des dommages climatiques ;
- elle valorise l'ensemble des émissions, et non pas l'écart entre une référence et une cible.

Dégradation du capital climatique et consommation du budget carbone

Les coûts induits par les émissions de gaz à effet de serre sont de deux natures.

- Les émissions de GES d'une année donnée, en se rajoutant au stock de GES déjà présents dans l'atmosphère dégradent le *capital climatique*, défini ici comme la capacité du climat à assurer un niveau de température et une météorologie suffisamment stable pour le bon exercice des activités humaines. Pour donner une valeur monétaire à cette dégradation, l'Insee retient l'estimation du *coût social du carbone* de Rennert *et al.* (2022)² de 172 €/tCO₂e en 2023. Ce chiffre, estimé au niveau mondial, comprend à la fois le coût pour l'économie, de 90 €/tCO₂e (dans la frontière du PIB) et le coût en termes de santé et de mortalité des populations, de 82 €/tCO₂e (hors de la frontière du PIB).
- Chaque année, émettre des gaz à effet de serre consomme une partie du budget carbone, ce qui contraint un peu plus les politiques à conduire pour le respecter. S'appuyant sur les travaux de la commission Quinet 2019³, l'Insee valorise le coût de consommation d'une tonne du budget carbone en 2023 à 154 euros.

Des indicateurs de produit intérieur et d'épargne nets

Le cadre standard comptable établit déjà des indicateurs nets de la consommation de capital fixe (CCF), comme le produit intérieur net (PIN) ou l'épargne nette. Ces indicateurs peuvent

¹ Larrieu S. et Roux S. (2020), « [Peut-on prendre en compte le climat dans les comptes nationaux ? L'épargne nette ajustée des effets liés au climat est négative en France](#) », dans Insee (2020), *Comptes nationaux. Espace thématiques*, coll. « Insee Références », décembre.

² Rennert K., Errickson F., Prest B. C. *et al.* (2022), « [Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂](#) », *Nature*, n° 610, septembre, p. 687-692.

³ France Stratégie (2019), [La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques](#), rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

être ajustés pour rendre compte de la dégradation du capital climatique mentionnés et de la consommation du budget carbone (voir Tableau 23).

L'ajustement comporte deux composantes : une liée à la dégradation du capital climatique, l'autre à celle de la consommation du budget carbone.

- Le produit intérieur net ajusté (PINA) consiste à ôter du produit intérieur net la dégradation du capital climatique causée par les émissions françaises et la consommation du budget carbone français.
- L'épargne nette ajustée permet de mesurer le gain (ou la perte) de patrimoine correspondant de l'année courante. Après prise en compte des dommages causés par les émissions mondiales et de la consommation du budget carbone, l'épargne nette devient négative, signalant un appauvrissement de la Nation.

Tableau 23 – Contribution des émissions à l'ajustement du PIN et de l'épargne nette en 2023 (en milliards d'euros courants)

Contributions et indicateurs agrégés et étendus	2023
Dommages dans le monde liés aux émissions françaises	69
Dans la frontière du PIB (A)	36
Hors de la frontière du PIB (AH)	33
Dommages en France liés aux émissions mondiales	274
Dans la frontière du PIB (B)	144
Hors de la frontière du PIB (BH)	131
Consommation du budget carbone (C)	57
Indicateurs agrégés et étendus	
Produit intérieur net (PIN)	2 294
PIN ajusté (PINA), (PIN - (A+C))	2 200
PINA étendu, (PINA-AH)	2 167
Épargne nette (EN)	68
EN ajustée (ENA), (EN - (B+C))	-133

Notes : la valorisation pour la France des dommages induits par les émissions mondiales est fondée sur sa part dans le PIB mondial, de 3 %. Il s'agit d'ordres de grandeur pouvant être fortement modifiés en s'appuyant sur des sources plus précises cherchant à évaluer les dommages spécifiques à la France. Les extensions du PINA et de l'ENA consistent à les diminuer également des dommages hors de la frontière du PIB.

Lecture : les émissions françaises (inventaire) et la consommation de budget carbone conduisent à ajuster à la baisse le PIN (de 36 et 57 milliards d'euros) en 2023, l'amenant de 2 294 milliards à 2 200 milliards. Les émissions mondiales et la consommation de budget carbone conduisent à ajuster à la baisse l'épargne nette (EN) respectivement de 144 et 57 milliards, la faisant passer de +68 à -133 milliards d'euros.

Sources : Insee, Eurostat, Citepa, douanes, OCDE, traitements Insee-SDES 2024 ; EDGAR, SNBC, Global Carbon Budget, calculs Insee

RECOMMANDATION DE LA COMMISSION

Poursuivre le développement d'une comptabilité nationale étendue, sur la base notamment des premières estimations réalisées par l'Insee, sur le produit intérieur net, l'épargne nette ou le coût implicite des engagements futurs.

1.5. Pour une valeur de l'action pour le climat européenne

L'Europe a d'ores et déjà mis en place un premier marché du carbone (EU-ETS 1) couvrant les émissions des secteurs énergétiques et industriels¹. Un second marché, couvrant les émissions des secteurs du bâtiment (chauffage) et des transports, devrait être mis en place en 2027. La décarbonation sera donc portée par la réduction progressive des quotas sur les deux marchés et par les tensions entre offre et demande relevés par les prix.

Pour autant, l'information donnée par le prix des quotas de CO₂ ne saurait se substituer à la valeur de l'action pour le climat :

- le prix de l'ETS 1 reste relativement volatil et renseigne davantage sur les tensions de court terme que sur le prix de l'ambition de long terme (liée à l'atteinte de l'objectif ZEN) ;
- le prix de l'ETS 2 devrait, dans un premier temps, être plafonné à 45 euros la tonne de CO₂.

Dans un tel contexte, il serait utile que l'Union européenne se dote d'une valeur de l'action pour le climat qui permette à la fois de prendre la mesure du prix de l'ambition et de disposer d'une référence pour mieux étayer ses choix et mettre en place les actions les plus efficaces. La Banque européenne d'investissement (BEI) a réalisé un premier pas en ce sens en adoptant une trajectoire de la valeur de l'action pour le climat proche de celles retenues par la France en 2019, mais son usage reste cantonné à l'évaluation des projets d'évaluation d'investissement qu'elle finance (voir *infra*). L'usage potentiel est beaucoup plus vaste, on l'a vu, dans un contexte où la dimension européenne des politiques climatiques devient prépondérante.

¹ Il couvrirait 18 % des émissions françaises en 2023, à un prix moyen de 88 €/tCO₂e. Voir Divialle J. et Fouquet M. (2024), « Une tarification des émissions de gaz à effet de serre inégale selon les secteurs », *op. cit.*

RECOMMANDATION DE LA COMMISSION

Concevoir une valeur de l'action pour le climat au niveau européen pour guider les politiques futures de mise en œuvre du Green Deal et renforcer la coopération européenne sur les enjeux climatiques.

2. Les usages « privés » de prix du carbone

Les usages « privés » de la valeur de l'action pour le climat restent encore peu développés, mais il convient de souligner les initiatives prises par quelques banques publiques et quelques entreprises pour se doter de référence interne, même si les niveaux retenus restent généralement inférieurs à la valeur de l'action pour le climat.

2.1. L'usage de la valorisation du carbone pour guider les choix de financement des projets de décarbonation : l'exemple de la Banque européenne d'investissement

La Banque européenne d'investissement (BEI) contribue au financement de projets internes ou externes à l'Union européenne, conformément aux objectifs stratégiques de cette dernière (croissance, emploi, cohésion régionale, viabilité environnementale¹).

Pour qu'un projet d'investissement fasse l'objet d'un financement par la BEI, celui-ci doit répondre à un critère de rentabilité économique dans une optique d'allocation efficace des ressources du groupe. Pour chaque projet, le taux de rentabilité économique² (ERR) – c'est-à-dire le taux de rentabilité socioéconomique – doit être supérieur au taux de rentabilité financière (FIRR), qui doit lui-même atteindre un seuil minimal.

Pour intégrer l'effet des externalités dans le calcul de rentabilité économique, la BEI retient une trajectoire de prix fictif du carbone (*shadow cost of carbon*) compatible avec l'objectif de +1,5 °C de réchauffement à la fin du siècle par rapport à l'ère préindustrielle. La trajectoire retenue par la BEI, déterminée à partir d'une revue des connaissances disponibles, est proche de celle retenue en 2019 par la commission Quinet 2019 (voir Tableau 24).

Tous les investissements permettant de réduire les émissions pour un coût d'abattement inférieur à cette valeur sont considérés rentables. La mobilisation du *shadow cost of carbon*

¹ <https://www.eib.org/fr/projects/index>

² Le taux de rentabilité économique d'un projet correspond au retour annuel moyen d'un capital investi sur l'ensemble de sa durée de vie.

permet, parmi les projets déjà rentables, de valoriser ceux qui sont les plus coûts-efficaces¹ (par exemple, les projets de reforestation – voir Encadré 15). À l'inverse, les activités ne contribuant pas à la décarbonation sortent du périmètre de financement (projets de production d'énergie à partir de combustibles fossiles², projets d'extraction des énergies fossiles ou d'extension des capacités aéroportuaires).

Tableau 24 – Trajectoire du *shadow cost of carbon* de la BEI sur la période 2020-2050 (en €₂₀₁₆/tCO₂)

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Valeur (€/tCO _{2e})	80	165	250	390	525	660	800

Source : BEI (2020), [Feuille de route du Groupe BEI dans son rôle de banque du climat 2021-2025](#), Banque européenne d'investissement, novembre, annexe 5, p. 135

Encadré 15 – Exemple d'un projet d'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie financé par la BEI³

Le projet considéré de réhabilitation d'un site existant de production de bioéthanol a pour but de maîtriser la consommation d'énergie et de stopper la hausse des émissions de GES du site. En plus de produire 240 000 m³ de bioéthanol par an, l'industrie dispose d'un site de liquéfaction du CO₂ issu de l'industrie alimentaire⁴.

Le montant d'investissement du projet est estimé à 28,2 millions d'euros, et comprend la rénovation du site (dont les systèmes d'automatisation), la réhabilitation du système de traitement des eaux usées, l'extension des *cleaning in place systems*, l'amélioration de l'efficacité des processus de récupération, la réutilisation de chaleur (10 millions d'euros) et l'amélioration des lignes de produits dérivées.

¹ Dans des situations spécifiques, la BEI peut financer des projets dont la rentabilité financière directe, mesurée par le FIRR, est négative, et à condition que les bénéfices environnementaux et sociaux du projet soient reflétés par un ERR largement positif. Cela peut concerner, par exemple, des projets publics dans le secteur de la forêt, tels que la restauration de milieux naturels.

² Au titre de sa politique de prêt dans le secteur de l'énergie, la BEI a arrêté de financer des projets énergétiques qui recourent aux combustibles fossiles sans dispositif d'atténuation en 2021.

³ BEI (2023), [The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB - 2nd Edition](#), Banque européenne d'investissement, mars.

⁴ *Ibid.*, p. 118-119.

Les gains énergétiques attendus devraient s'élever à 20 %, soit 36 GWh/an (relativement à la situation avant-projet). Ils permettraient d'augmenter la capacité de production de bioéthanol de + 10 000 m³ par an et de réduire la demande globale en gaz même en incluant la hausse de production. Les émissions de CO₂ liées à l'extension des capacités de production seraient plus que compensées par les baisses d'émissions liées aux économies d'énergie (7 300 tonnes de CO₂ économisées par an). Les résultats de l'analyse coûts-bénéfices sont étudiés sur une période de référence de dix-sept ans, dont deux ans pour la réhabilitation du site (voir Tableau 25).

Tableau 25 – Coûts et bénéfices du programme de rénovation d'un site industriel de bioéthanol

	Coûts et bénéfices (en euros 2020 constants)	Valeur	Total	Actualisé (5 %)
(1)	Coût d'investissement	M€	10	9,3
	Économies d'énergie	GWh	540	338,9
	Émissions de CO ₂ évitées	tonnes	109 058,4	68 449,8
	Émissions de NO _x évitées	tonnes	73,9	46,4
(2)	Coûts évités de carburant	M€	18	11,2
(3)	Coût social du carbone évité	M€	31,3	18,2
(4)	Coût de la pollution de l'air évité	M€	0,9	0,6
(5) = (2)+(3)+(4)	Bénéfice économique total	M€		30
(6) = (5)-(1)	Valeur économique présente nette	M€		20,7

ERR - EE	23,5 %
EE CAPEX / CAPEX TOTAL	36 %
ERR	8,5 %

Source : BEI (2023), *The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB - 2nd Edition*, Banque européenne d'investissement, mars, tableau 22-2, p. 119

2.2. La définition d'un prix interne du carbone comme appui aux stratégies de décarbonation des entreprises

Plusieurs entreprises ont mis en place un prix interne du carbone. Cette section s'appuie sur les expériences partagées au sein de la commission par les groupes Getlink (exploitant du tunnel sous la Manche, opérateur de fret ferroviaire et gestionnaires d'infrastructures) et Saint-Gobain (fabricant de matériaux de construction).

Exemple 1 : la « marge décarbonée » de Getlink

Le groupe Getlink¹ s'est engagé dans une démarche de réduction de ses émissions de 30 % en 2025 et de 54 % en 2030 par rapport à 2019 en scopes 1 et 2. Dans ce cadre, et dans un objectif de concilier performance financière et extra-financière, le groupe s'est appuyé sur un prix du carbone pour construire un indicateur financier de « marge décarbonée ».

Le principe consiste à calculer une marge décarbonée en retranchant de la marge d'exploitation le coût des émissions de CO₂ (émissions x prix interne du carbone). Le prix interne retenu est en l'occurrence le coût social du carbone défini par l'Agence de protection de l'environnement américaine (EPA), soit 205 €/tCO₂. Le choix de ne pas retenir le prix de l'EU-ETS tient à une trop forte volatilité sur le marché et son horizon relativement court-termiste. Le résultat (voir Tableau 26) montre que la marge d'exploitation n'est que faiblement réduite lorsque l'on y retranche l'impact des émissions de scopes 1 et 2, mais que la correction est plus significative lorsque l'on prend en compte l'impact du scope 3.

Tableau 26 – Marge décarbonée

	2024	% EBITDA	2023 * recalculé	% EBITDA
Prix du carbone (€/tonne CO ₂ e)	205 €		201 €	
EBITDA consolidé	833 M€	100 %	990 M€	100 %
Émissions carbone Scopes 1+2 (tonnes CO ₂ e)	41 766		49 901	
Facture carbone sur Scopes 1+2	9 M€	1,0 %	9 M€	0,9 %
Marge décarbonée sur Scopes 1+2	824 M€	99 %	981 M€	99 %
Émissions carbone Scopes 1+2+3 (tonnes CO ₂ e)	156 997		154 498	
Facture carbone Scopes 1+2+3	32 M€	3,9 %	31 M€	3,1 %
Marge décarbonée sur Scopes 1+2+3	801 M€	96 %	959 M€	97 %

Source : [Getlink](#)

Encadré 16 – Exemple d'usage d'un prix interne du carbone par Getlink : cas de modules photovoltaïques

Dans le cadre de sa trajectoire de décarbonation, le Groupe Getlink a initié un projet de développement de centrales photovoltaïques sur la concession Eurotunnel d'une puissance de 45 Mwc². L'intensité carbone des modules photovoltaïques analysés dans la phase de consultation des fournisseurs s'étend de 250 à 800 gCO₂e/kW.

¹ Exploitant du tunnel sous la Manche, opérateur de fret ferroviaire et gestionnaire d'infrastructures.

² MégaWatt-crête.

Ces intensités carbone diffèrent principalement selon la localisation des chaînes de production et la source d'énergie utilisée pour la fabrication.

En appliquant un prix carbone de 205 €/tCO₂e, la prise en compte de l'externalité environnementale négative de l'intensité carbone des modules revient donc à considérer un surcoût financier de 0,05 € à 0,16 €/kW. Or, les prix des modules varient sur une gamme d'environ 0,10 à 0,20 €/kW, selon que le module soit produit en Chine avec une électricité carbonée ou qu'une partie de sa production soit réalisée en France avec des coûts de production certes supérieurs mais une empreinte carbone réduite. De plus, les prix des modules sont globalement inversement proportionnels à leur poids carbone. Ainsi, une comparaison juste des offres incluant l'externalité carbone liée à la production du panneau reviendrait à comparer la fourchette basse $0,10 + 0,16 = 0,26$ €/kW à la fourchette haute $0,20 + 0,5 = 0,25$ €/kW : dans ce cas de figure, l'intégration d'un prix interne du carbone va permettre à Getlink d'envisager le coût des modules selon une vision plus exhaustive de leur impact véritable.

Source : éléments communiqués par Getlink

Exemple 2 : le prix interne du carbone du groupe Saint-Gobain

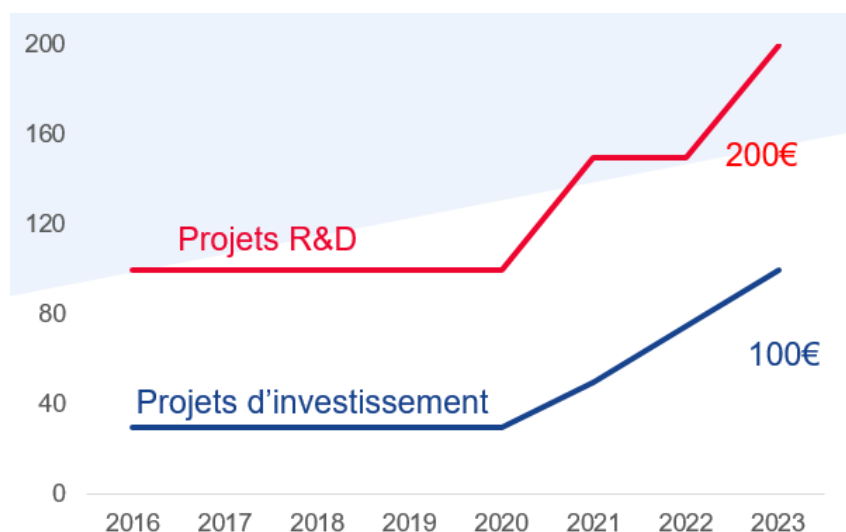
Le groupe Saint-Gobain¹ s'est engagé depuis 2017 à réduire ses émissions de GES d'un tiers en 2030 (par rapport à 2017) en scopes 1 et 2, et de 16 % en scope 3. Le prix du carbone est utilisé en appui de cette démarche. Dans un premier temps fixés à un niveau relativement faible, proches du prix des quotas de l'ETS, les deux prix du carbone s'élevaient en 2024 à 100 €/tCO₂ pour le prix applicable aux investissements, 200 €/tCO₂ pour celui applicable à la R & D amont (TRL² 1 à 4) (voir Graphique 36).

Les exemples de Saint-Gobain et Getlink montrent que l'usage d'un prix interne du carbone a d'abord une dimension pédagogique, en aidant les managers à se projeter dans un monde où le prix du carbone sera plus élevé, et contribuent à ce titre à éclairer et orienter les choix de long terme.

¹ Spécialisé dans la fabrication de matériaux de construction (verre, isolation, plaque de plâtres, etc.).

² Le *Technology Rediness Index* (TRI) est un indice qui mesure le niveau de maturité d'une technologie.

Graphique 36 – Évolution des prix internes du carbone de Saint Gobain depuis leur mise en place



Source : Saint-Gobain

RECOMMANDATION DE LA COMMISSION

Promouvoir l'utilisation des prix internes du carbone dans les stratégies d'entreprise.

La place du prix du carbone dans les nouvelles obligations de reporting financières et extrafinancières

Venant remplacer la NFRD (*Non Financial Reporting Directive*), la CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) européenne rend obligatoire la publication d'informations de durabilité normées dans leur rapport de gestion par les grandes entreprises.

Les entreprises doivent publier des informations sur leurs impacts, risques et opportunités (IRO) liés aux enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance selon un critère de « double matérialité » – impact sur la société et l'environnement (matérialité d'impact) et implications financières probables (matérialité financière). Dans ce cadre, la norme E1 a pour but de renforcer les obligations de publication relatives à la baisse des émissions de gaz à effet de serre et à l'adaptation au changement climatique. Il est notamment demandé aux entreprises d'indiquer si « elles appliquent des mécanismes de tarification interne du carbone » (voir Encadré 17).

Les initiatives privées de prise en compte d'un prix interne du carbone, encore rares, sont à encourager. Il est utile qu'un nombre croissant d'acteurs privés puissent se doter de références internes de prix du carbone – en s'inspirant de la valeur de l'action pour le climat, dont l'un des mérites est de décrire une trajectoire croissante dans le temps, garantissant ainsi que les impacts carbone de moyen-long terme ne soient pas écrasés par le jeu de l'actualisation.

Encadré 17 – Extrait des exigences de publication de la CSRD en matière de tarification du carbone (E1-8)

« 62. L'entreprise indique si elle applique des mécanismes de tarification interne du carbone et, dans l'affirmative, comment ceux-ci soutiennent sa prise de décision et encouragent la mise en œuvre de politiques et de cibles liées au changement climatique. »

« 63. Les informations requises au paragraphe 62 comprennent :

(a) le type de mécanisme de tarification interne du carbone, par exemple l'utilisation de prix fictifs dans la prise de décisions relatives aux CapEX ou aux investissements en recherche et développement (R&D), ou encore l'utilisation de redevances carbone internes ou de fonds carbone internes ;

(b) le champ d'application spécifique des mécanismes de tarification du carbone (activités, étendues géographiques, entités, etc.) ;

(c) les prix du carbone appliqués en fonction du type de mécanisme et des hypothèses critiques retenues pour déterminer les prix, y compris la source des prix du carbone appliqués et les raisons pour lesquelles ces prix sont jugés pertinents pour l'application qui en est faite. L'entreprise peut publier la méthode de calcul des prix du carbone, y compris la mesure dans laquelle ceux-ci ont été fixés sur la base d'orientations scientifiques et la manière dont leur évolution future est liée aux trajectoires de tarification du carbone fondées sur des données scientifiques ; ainsi que

(d) pour l'année en cours, les volumes d'émissions brutes de GES de périmètres 1, 2 et, le cas échéant, de périmètre 3, exprimés en tonnes métriques équivalent CO₂ couverts par ces mécanismes, de même que leur proportion dans les émissions totales de GES de l'entreprise pour chaque périmètre respectif. »

« AR 65. Lorsqu'elle publie les informations requises au titre des paragraphes 62 et 63, le cas échéant, l'entreprise explique brièvement si et comment les prix du carbone utilisés dans les mécanismes de tarification interne du carbone sont

cohérents avec ceux utilisés dans les états financiers. Ces explications concernent les prix internes du carbone utilisés pour :

- (a) l'évaluation de la durée de vie utile et de la valeur résiduelle de ses actifs (immobilisations incorporelles, immobilisations corporelles) ;
- (b) la dépréciation des actifs ; et
- (c) l'évaluation de la juste valeur des actifs acquis par l'intermédiaire de l'achat d'entreprises. »

Source : Règlement délégué (UE) 2023/2772 de la Commission du 31 juillet 2023 complétant la directive 2013/34/UE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les normes d'information en matière de durabilité, p. 83 et p. 106



RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

Recommandations relatives à l'usage de la valeur de l'action pour le climat

1 – Officialiser la trajectoire proposée de la valeur de l'action pour le climat pour permettre à tous les acteurs de la société – État et collectivités territoriales, régulateurs sectoriels en charge des secteurs clés de la décarbonation, mais également entreprises, organisations non gouvernementales, *think tanks*, etc. – de disposer d'une référence commune et cohérente avec la SNBC 3.

2 – Utiliser la valeur de l'action pour le climat pour bien identifier le périmètre des actions de décarbonation utiles et nécessaires, dans la lignée des travaux de la commission Criqui sur les coûts d'abattement.

3 – Utiliser la valeur de l'action pour le climat pour valoriser les impacts carbone des projets d'investissements.

- Inscrire la nouvelle valeur de l'action pour le climat dans les référentiels d'évaluation socioéconomique des investissements publics.
- Pleinement valoriser les gains carbone que les projets « bas carbone » recèlent – soit que ceux-ci permettent d'abattre des émissions existantes, soit qu'ils permettent de « sécuriser » dans la durée les solutions décarbonées et d'éviter ainsi le retour toujours possible des énergies fossiles.
- Préciser la valorisation des projets dont l'impact n'est pas permanent, notamment ceux portant sur les puits forestiers, pour tenir compte des temps de régénération des forêts et des risques de destruction (incendies, tempêtes, maladies, etc.).
- Promouvoir l'usage des prix internes du carbone dans les stratégies d'entreprises.

4 – Établir des bilans socioéconomiques des principales mesures envisagées pour changer les comportements et encourager les investissements « bas carbone », en poursuivant notamment les premiers travaux engagés de calcul des prix implicites pour les normes et les subventions.

5 – Compléter la valeur de l'action pour le climat d'une évaluation des enjeux de redistribution et de compétitivité – dans le cadre notamment de l'évaluation des impacts socioéconomiques de la SNBC 3 – pour aider à la définition des bonnes combinaisons d'instruments (tarification, subventions, normes).

6 – Utiliser la valeur de l'action pour le climat pour éclairer les enjeux macroéconomiques des politiques d'atténuation.

- Poursuivre le développement d'une comptabilité nationale étendue, sur la base notamment des premières estimations sur le produit intérieur net, l'épargne nette ou le coût implicite des engagements futurs.

Recommandations sur l'agenda de travail des prochaines années pour mettre à jour et compléter les évaluations socioéconomiques

7 – Actualiser la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat lors de chaque nouvelle révision de la Stratégie nationale bas carbone. Pour préparer cette actualisation dans les meilleures conditions :

- actualiser les coûts d'abattement pour intégrer les informations nouvelles sur le coût et la disponibilité des technologies « bas carbone », ainsi que sur l'évolution des comportements ;
- approfondir les travaux de modélisation économique engagés par les administrations des ministères en charge de l'Écologie et de l'Économie, concernant notamment l'usage des sols, les forêts et l'agriculture, et approfondir la quantification des incertitudes associées à la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat.

Recommandation sur le calcul d'une valeur européenne de l'action pour le climat

8 – Concevoir une valeur de l'action pour le climat au niveau européen pour guider les politiques futures de mise en œuvre du Green Deal et pour renforcer la coopération européenne sur les enjeux climatiques.

La commission recommande qu'un petit groupe de travail issu de ses rangs puisse, en lien avec le conseil scientifique des méthodes d'évaluation socioéconomique de France Stratégie, assurer le suivi de ces recommandations.



ANNEXES



ANNEXE 1

LETTRE DE MISSION

Le Premier Ministre

Paris, le 17 AVR. 2024

CAB/2024D/20284

Monsieur l'Inspecteur Général,

Comme vous le savez, le Président de la République a décidé la mise en place d'une planification écologique. Dans ce cadre, la stratégie française pour l'énergie et le climat vise à tracer un chemin économiquement efficace et socialement juste pour atteindre l'objectif « zéro émission nette » à l'horizon 2050.

La valeur de l'action pour le climat, telle que la commission que vous avez présidée en 2018 l'a définie, a un rôle central à jouer pour orienter les politiques publiques et les choix d'investissement, en offrant un référentiel commun à l'ensemble des acteurs publics et privés.

Comme vous l'aviez vous-même recommandé, il est utile de réviser à échéances régulières la trajectoire de cette valeur, pour tenir compte à la fois des nouveaux objectifs de réduction des émissions à l'horizon 2030, des progrès dans les technologies de décarbonation, mais aussi de l'évolution des prix de l'énergie, de celle des puits de carbone etc. Il est aussi utile de tirer profit à cette occasion des progrès dans les méthodes d'évaluation socio-économiques (révision des taux d'actualisation, prise en compte du risque, calcul des coûts d'abattement).

Je souhaite ainsi que vous réunissiez, comme vous l'aviez fait en 2008 puis en 2018, une commission pour réévaluer la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat cohérente avec l'objectif de neutralité carbone en 2050 et au-delà. Elle procédera également à une analyse des usages faits de cette valeur dans l'élaboration et l'évaluation des politiques publiques ainsi que dans les choix d'investissement publics et privés. Elle formulera des recommandations pour les étendre ou les améliorer.

Vous veillerez à la bonne articulation des travaux de votre commission avec l'élaboration de la stratégie nationale bas carbone. Vous associerez étroitement à vos travaux :

- la commission de l'économie du développement durable, qui réunit des responsables d'administration, des experts et des représentants de la société civile et a pour mission d'éclairer l'élaboration et l'évaluation des politiques publiques dans le domaine de la transition écologique.
- le comité d'experts des méthodes d'évaluation socio-économique, chargé notamment de préciser les règles du calcul socio-économique et son champ d'application.

Monsieur Alain QUINET
France Stratégie
20 avenue de Ségur
75700 PARIS

Afin que la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat puisse être intégrée dans le projet de stratégie nationale bas-carbone qui sera mis en consultation au dernier trimestre 2024, vous me remettrez un rapport d'étape d'ici le début du mois d'octobre 2024 puis votre rapport définitif d'ici la fin de l'année.

France Stratégie assurera le secrétariat de la commission que vous présiderez. Vous pourrez vous appuyer sur l'ensemble des administrations compétentes, au premier rang desquelles la direction générale de l'énergie et du climat, la direction générale du Trésor et le commissariat général au développement durable. Vous tiendrez le secrétariat général à la planification écologique régulièrement informé de l'avancée des travaux.

Je vous prie de bien vouloir agréer, Monsieur l'Inspecteur Général, l'expression de mes sentiments les meilleurs.



Gabriel ATTAL



ANNEXE 2

COMPOSITION DE LA COMMISSION

Président

Alain Quinet

Membres

Fanny Arav, secrétaire générale adjointe de l'UNSA-Ferroviaire, conseillère au Conseil économique social et environnemental (CESE)

Claire Bordenave, conseillère à la fédération nationale mines et énergie de la Confédération générale du travail (CGT), ancienne conseillère au CESE et au Conseil supérieur de l'énergie

Dominique Bureau, chef économiste, Société des grands projets (SGP)

Paul Busi, Confédération française démocratique du travail (CFDT)

Nicolas Carnot, directeur des études et synthèses économiques, Insee

Sylvain Cauria, économiste, Banque européenne d'investissement

Frédéric Cherbonnier, professeur d'économie, Sciences Po Toulouse et Toulouse School of Economics

Édouard Chrétien, sous-directeur de la transition écologique, service des politiques écologiques et sectorielles, Direction générale du Trésor

Audrey Coreau, cheffe du service de l'Économie verte et solidaire, Commissariat général au développement durable (CGDD)

Anna Creti, professeure d'économie, directrice de la chaire Économie du climat, université Paris-Dauphine-PSL

Patrick Criqui, directeur de recherche émérite, CNRS, université Grenoble-Alpes

Anne Epaulard, professeure d'économie, directrice du département Économie et environnement, Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE)

Mathieu Garnero, chef du service Économie et finance, Agence de la transition écologique (Ademe)

Alexandre Gautier, adjoint au directeur général de la stabilité financière et des opérations, Banque de France

Pascal Gautier, économiste pôle Évaluation, secrétariat général pour l'investissement (SGPI)

Alain Grandjean, associé-cofondateur, Carbone 4

Joseph Hajjar, directeur de programme Énergie et Climat, Secrétariat général à la planification écologique (SGPE)

Louise Kessler, directrice de programme Outils de pilotage, financement de la transition, Institut d'économie pour le climat (I4CE)

Marion Leroutier, enseignante-chercheuse, Centre de recherche en économie et statistique (CREST), ENSAE

Selma Mahfouz, directrice Expertise ESG de Crédit Mutuel Alliance Fédérale

Alma Monserand, économiste, Ademe

Emmanuel Normant, directeur du développement durable, groupe Saint-Gobain

Xavier Ploquin, directeur d'investissement, Meridiam

Philippe Quirion, Réseau Action Climat

Sébastien Roux, directeur de programme des comptes nationaux augmentés, INSEE

Katheline Schubert, professeure émérite, Paris School of economics (PSE)

Diane Simiu, directrice du climat, de l'efficacité énergétique et de l'air, direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)

Jean-Michel Trochet, économiste, EDF, Direction de la stratégie groupe

Équipes de modélisation

CGDD

Jules Bourgueil
Mathieu Fouquet
Alexandre Godzinski
Boris Le Hir

DGEC

Yanis Chaigneau

DG Trésor

Pierre-Louis Girard
Logan Gourmand
Romain Grept
Jean-Baptiste Laval



ANNEXE 3

AUDITIONS ET ORGANISMES CONSULTÉS

Personnes auditionnées

Les personnes suivantes ont été auditionnées au cours des travaux, en plus des membres de la commission.

Jean Boissinot, secrétaire général, Network for Greening the Financial System (NGFS)

Philippe Geoffreoy, directeur propriété intellectuelle, normes et homologations et performance environnementale, SOMFY group

Paul Champey, spécialiste économie et finance durable, Banque de France

Christian Gollier, professeur de sciences économiques, directeur général, Toulouse School of Economics

Léopold Gosset, spécialiste risques climatiques, Banque de France

Cyril Jean, R & D portfolio manager, groupe Saint-Gobain

Uriel Kaufman, chef de la mission de la synthèse et de l'analyse stratégique, direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM)

Yann Leriche, chief executive officer, Getlink

Joël Maurice, économiste

Mehdi Medmoun, chargé de mission politique et économie des transports, DGITM

Christian Savy, contrôleur financier, groupe Saint-Gobain

Charles Weymuller, chef économiste, EDF

Organismes consultés

Ont en outre été consultés :

- le conseil scientifique des méthodes d'évaluation socioéconomique de France Stratégie, comprenant, outre certains membres de la commission elle-même, **Marc Fleurbaey, Luc Baumstark, Jean-Paul Bouttes, Karine Fiore, Jean-Michel Josselin, Yann Kervinio, Jean-Paul Ourliac, Émile Quinet, Carine Staropoli, Frédérique Sachwald.**
- les personnalités qualifiées de la Commission de l'économie du développement durable : **Émilie Alberola, Mireille Chiroleu-Assouline, Matthieu Glachant, Christian Gollier, Sandrine Mathy, Christian de Perthuis, Xavier Timbeau, Nicolas Treich.**



ANNEXE 4

COMPLÉMENTS AU RAPPORT (À PARAÎTRE)

Ces compléments ont été produits par des membres de la commission et contributeurs des travaux, dans le but d'approfondir certains concepts évoqués dans le rapport. Ils seront mis en ligne prochainement sur le site de France Stratégie.

Jules Bourgueil, Boris Le Hir et Olivier de Guibert, « TiTAN : un modèle technico-économique du système énergétique français pour une transition bas-carbone coût-efficace », CGDD.

Dominique Bureau, « Quel prix du carbone pour évaluer la production et l'épargne véritables dans les Comptes nationaux ? »

Frédérique Cherbonnier, « Taux d'actualisation et valeur de l'action pour le climat ».

Patrick Criqui, « Les enseignements de la Commission coûts d'abattement ».

Mathieu Fouquet et Alexandre Godzinski, « La valeur de l'action française pour le climat dans un cadre international : une évaluation par le modèle stylisé Vulcain », CGDD.

Sylvain Larrieu et Sébastien Roux, « Peut-on prendre en compte le climat dans les comptes nationaux ? », Insee.

Aude Pommeret, « Le concept de dette climatique ».

Katheline Schubert, « Après Hotelling : l'évolution de la valeur de l'action pour le climat post-ZEN ».

Jean-Michel Trochet, « Coût prospectif (2050) des technologies décarbonées pour secteurs difficiles à décarboner : exemple du carburant liquide ».

Jean-Michel Trochet, « Utilité d'un modèle de gestion optimisée d'un budget carbone ».



ANNEXE 5

DESCRIPTION DES MODÈLES UTILISÉS DANS LE CADRE DE LA COMMISSION

1. Le modèle TiTAN : une approche technico-économique

Le modèle TiTAN (Trajectoire des technologies d'abattement vers la neutralité) développé au sein du CGDD et cofinancé par la DGEC et France Stratégie, est un modèle technico-économique d'optimisation du système énergétique français¹. Il a pour objectif d'identifier les trajectoires les moins coûteuses de décarbonation de ce système et à en produire une description technologiquement cohérente et détaillée, à l'horizon 2050 et au-delà. Il couvre à la fois la production d'énergie et les principaux secteurs consommateurs d'énergie : transport, industrie et bâtiment (voir Figure A1 *infra*).

TiTAN est un modèle d'optimisation sous contrainte

Il prend en entrée des projections (i) de coût des énergies primaires, (ii) de coût et d'efficacité des technologies disponibles, (iii) de demande en services énergétiques, ainsi que (iv) diverses contraintes définies par l'utilisateur, notamment une contrainte sur les émissions de GES dite « contrainte carbone ». Il renvoie la trajectoire d'investissement et des technologies qui satisfait la demande au coût intertemporel minimal de déploiement sous les contraintes définies par l'utilisateur.

La résolution du modèle par minimisation du coût sous contrainte carbone correspond à un traitement coût-efficacité de l'externalité climatique. Si une technologie n'est pas mobilisée, c'est qu'il en existe d'autres qui permettent d'atteindre la même réduction d'émissions totales à moindre coût. Inversement, si un investissement est réalisé, c'est qu'il participe à la trajectoire vers la neutralité la moins chère possible.

¹ Le périmètre géographique de TiTAN se limite à la France métropolitaine.

Ti TAN est un modèle bottom-up

Il décrit explicitement et avec détail les technologies, présentes et futures, qui composent le système énergétique et industriel (centrales électriques, bâtiments et leurs équipements, parc de véhicules, etc.). La demande totale en énergie finale, la production et le coût des énergies résultent donc de l'agrégation d'éléments individuels détaillés dans la modélisation. Cette modélisation s'oppose à la logique *top-down* de la plupart des modèles macro-économiques, où ces variables sont directement décrites par des fonctions agrégées.

Ti TAN est un modèle intégré du système énergétique et industriel.

Ti TAN se distingue dans le paysage des modèles technico-économiques d'optimisation du système énergétique par un traitement des choix technologiques entièrement fondé sur le critère « coût-efficacité », en excluant tout effet lié aux comportements des agents (voir Encadré A1).

Le modèle tient compte des effets de rétroaction des choix technologiques d'un secteur sur les autres. Par exemple, il permet de rendre compte des tensions entre disponibilité et besoins induits par l'électrification simultanée des transports, du chauffage résidentiel et de l'industrie.

Encadré A1 – Ti TAN, un modèle fondé sur le critère coût-efficacité

Le programme schématique du modèle Ti TAN est le suivant :

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\text{investissement} \\ \text{activité}}} \text{Coût intertemporel actualisé} &= \sum_{t \in T} \text{Coût annuel actualisé}_t \\ &= \sum_{t \in T} \frac{(\text{coût des énergies primaires}_t + \text{amortissements CAPEX}_t + \text{OPEX}_t)}{(1 + \text{taux d'actualisation})^{t-t_{ref}}} \end{aligned}$$

Sous contraintes :

- satisfaction de la demande en service énergétique
- contrainte carbone : $\begin{cases} \text{si approche "flux"} : \forall t > t_0, \text{Émissions de GES}_t \leq \text{Plafond}_t \\ \text{si approche "budget"} : \sum_{t > t_0} \text{Émissions de GES}_t \leq \text{Budget} \end{cases}$

Avec : t_0 l'année de calage du modèle ; t_{ref} l'année de référence pour l'actualisation ; T l'ensemble des années modélisées.

Le traitement strictement exogène de la demande dans TiTAN permet une explication relativement simple des choix du modèle, et, à demande donnée, les fait reposer exclusivement sur les sous-jacents technologiques¹.

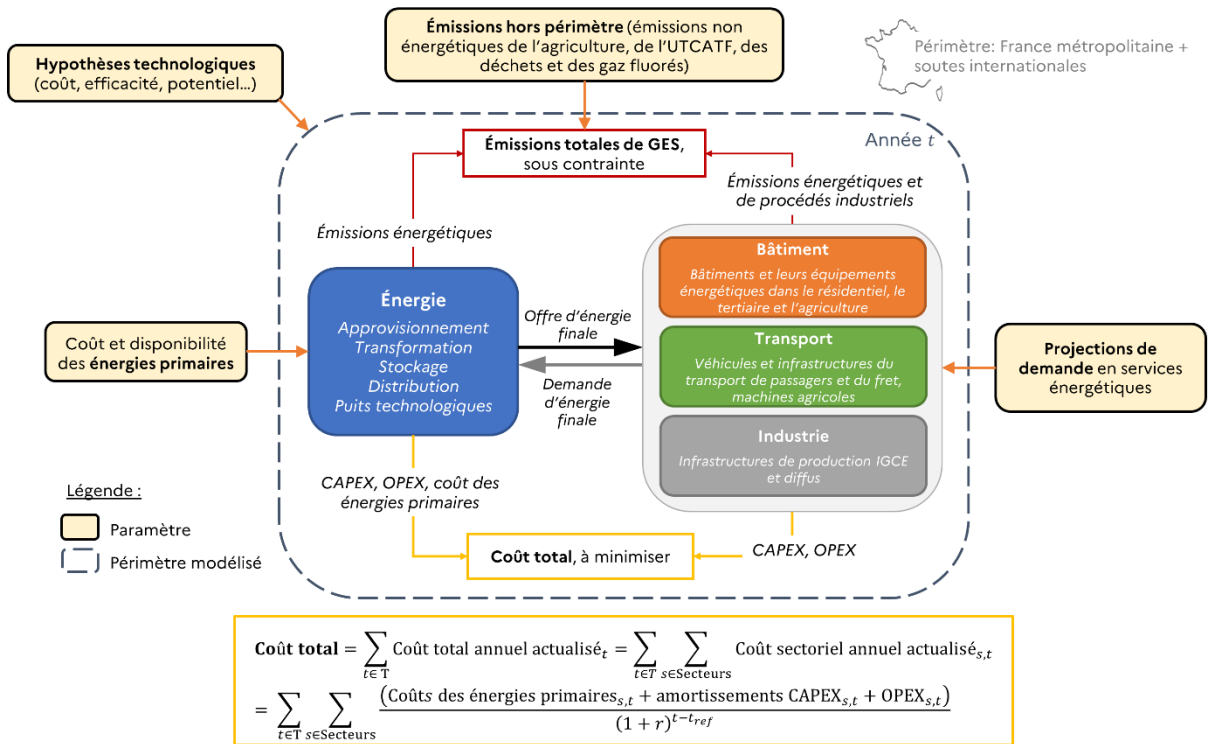
TiTAN décompose le système énergétique en quatre secteurs :

- un secteur de production-transport-distribution d'énergie dit « secteur amont »,
- trois secteurs consommateurs d'énergie dits secteurs « avals » : le bâtiment (résidentiel et tertiaire), le transport (de passagers et de marchandises, avec les routes internationales) et l'industrie.

Ces secteurs sont principalement reliés entre eux par l'équilibre énergétique : la disponibilité en énergie assurée par le secteur « amont » doit satisfaire la demande des trois secteurs « aval ». Cependant, d'autres paramètres ou variables peuvent assurer la cohérence intersectorielle. Par exemple, les technologies biosourcées du secteur énergie et la filière construction du secteur industrie puisent dans le même stock de bioressources, respectivement pour des usages énergie et matière. De même, la fourniture d'hydrogène pour les usages matières du secteur industrie peut être assurée, soit en interne au secteur industrie par consommation de gaz fossile, soit par le secteur énergie via l'électrolyse.

¹ Les modèles technico-économiques du système énergétique les plus utilisés aujourd'hui (par exemple, les modèles issus du générateur TIMES de l'IEA-ETSAP, Richard Loulou et Gary Goldstein, *Documentation for the TIMES Model – Part I*, 2016) sont en réalité des modèles hybrides, au sens où ils intègrent une composante comportementale. Celle-ci consiste le plus fréquemment en un traitement endogène de la demande finale *via* des élasticités-prix (même si d'autres extensions complémentaires sont possibles, par exemple des anticipations imparfaites). Cette extension transforme des modèles strictement technico-économiques, résolus en minimisant le coût technique du système, en des modèles d'équilibre partiel, résolus en maximisant un « surplus total » incluant le coût technique. Si on peut reconnaître que cette extension permet, dans un certain sens, d'améliorer la vraisemblance des résultats à court-moyen terme, elle tend cependant à compliquer grandement leur interprétation. De plus, les élasticités évaluées sur des observations passées embarquent des rigidités qui pourraient disparaître progressivement à long terme ou suite à des chocs majeurs.

Schéma A1 – Structure du modèle TiTAN

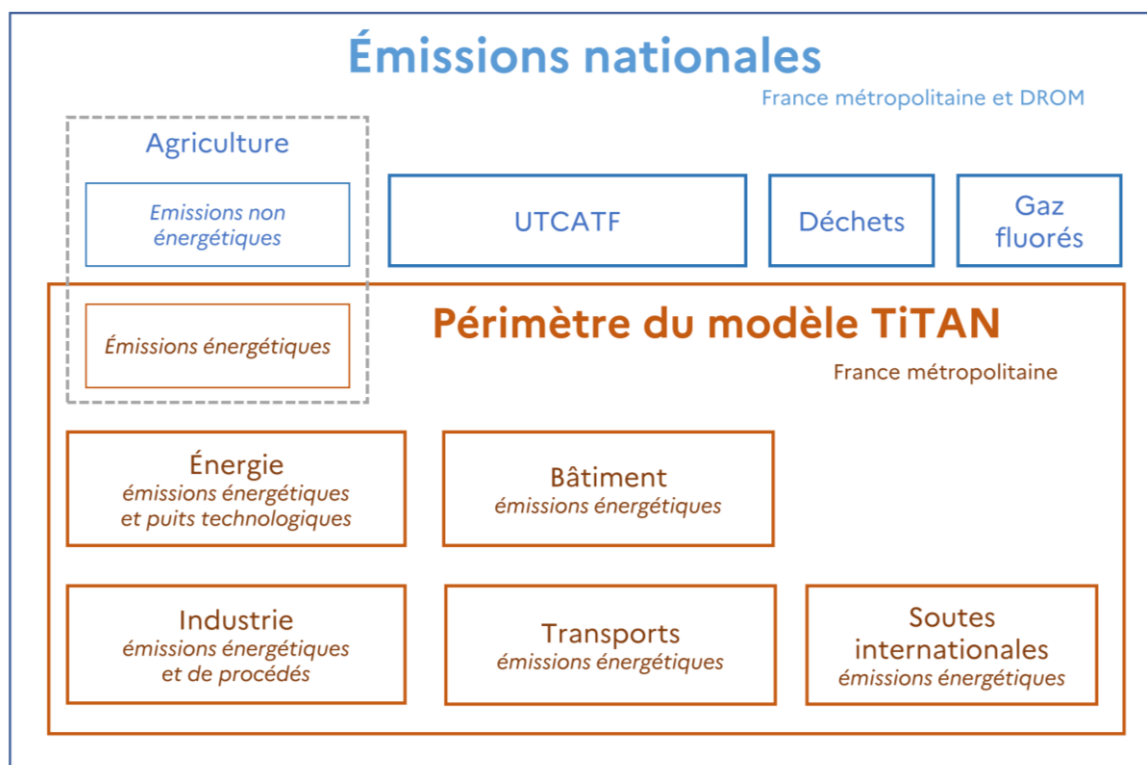


Source : CGDD

Le périmètre de TiTAN

Le périmètre de comptage des émissions comprend, pour la France métropolitaine, les émissions des secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports (dont les soutes internationales), du bâtiment, les émissions énergétiques de l'agriculture et les émissions négatives des puits technologiques (voir Figure A2). Ce périmètre représente 308 MtCO₂e en 2023, soit 82 % des émissions métropolitaines (hors UTCATF). Le reste des émissions nationales n'est pas inclus dans le périmètre d'optimisation : il s'agit des émissions non énergétiques de l'agriculture et de celles liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la forêt (UTCATF), des émissions du secteur des déchets et les émissions de gaz fluorés (hors industrie).

Schéma A2 – Périmètre des émissions optimisées par TiTAN versus périmètre des émissions territoriales totales de la SNBC



Source : CGDD

2. Le modèle ThreeME : une approche macroéconomique sectorielle

ThreeME représente l'économie française sous la forme d'une petite économie ouverte, qui échange avec le reste du monde, dont les conditions économiques, hors effets de compétitivité-prix, sont supposées exogènes (demande mondiale adressée à la France, taux de change, prix de référence étrangers) (voir Figure A3 *infra*).

ThreeME repose sur un cadre théorique néo-keynésien

À court terme, l'économie est déterminée par les comportements de demande, tandis qu'à long terme l'évolution des variables est déterminée par des facteurs d'offre. Ainsi, les différentes catégories de variables économiques, que ce soit les volumes (e.g. les investissements productifs, l'emploi, les exportations, les importations) ou les prix (de production, d'exportations et d'importations) s'ajustent aux chocs exogènes touchant l'économie avec un certain délai, avant de converger vers leur niveau d'équilibre. Celui-ci est déterminé à partir de programmes de maximisation sous contrainte, les entreprises cherchant à maximiser leurs profits sous la contrainte de leurs coûts de production et des

technologies tandis que les ménages maximisent leurs consommations en fonction de leur revenu et des prix.

Cette approche se traduit par des dynamiques de court terme et de long terme différenciées. Par exemple, si les investissements des entreprises sont indexés unitairement sur la production à long terme, ils augmentent plus que proportionnellement que celle-ci à court terme afin de traduire un effet accélérateur.

À la différence des modèles d'équilibre général calculable traditionnels, d'inspiration néo-classique, l'intégration de rigidités nominales et réelles à court terme traduit un ajustement des marchés par les volumes, ce qui rend compte de déséquilibres transitoires, par exemple à travers la possibilité d'un chômage involontaire et des effets multiplicateurs keynésiens.

Enfin, la spécification de l'équation des salaires structure largement les dynamiques de moyen-long terme dans ThreeME, notamment via la compétitivité des entreprises. Par défaut, il est fait l'hypothèse que les salaires s'indexent sur les prix de valeur ajoutée, traduisant une stabilité de la part de la rémunération du travail dans la valeur ajoutée à long terme. Dans le cas où les salaires sont indexés sur les prix de consommation, lesquels intègrent le signal-prix du carbone, ceux-ci croissent plus rapidement que s'ils étaient indexés sur le prix de valeur ajoutée, se traduisant par un niveau de consommation plus élevée (moindre perte de pouvoir d'achat), mais une baisse des exportations, du fait d'une perte de compétitivité alimentée par la boucle prix-salaires.

ThreeME est un modèle multisectoriel

Dans ThreeME, chaque secteur détermine d'abord sa demande en travail, en énergie agrégée, en consommations intermédiaires non-énergétiques agrégées et en investissement, en fonction de la production, du progrès technique et du coût de production de chaque facteur relativement aux coûts des autres facteurs¹. Le secteur définit ensuite son bouquet énergétique (c'est-à-dire la consommation en électricité, en charbon, en pétrole et en gaz) et la composition des consommations intermédiaires issues de la production des autres secteurs. Le secteur arbitre enfin entre les intrants domestiques et importés, en fonction de la demande et des prix domestiques relativement aux prix des biens importés. La version utilisée dans le cadre de la commission présente 37 secteurs

¹ Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de la production, traduisant une demande plus importante adressée aux secteurs, se traduit par une hausse de la demande de facteurs ; une hausse du progrès technique permet de réduire la demande en facteur pour un niveau de production donné ; enfin, un accroissement du coût de production relatif d'un facteur incite les secteurs à réduire leur demande pour celui-ci au profit des autres facteurs.

(dont 17 énergétiques) produisant 24 biens et services (dont quatre énergétiques : électricité, charbon, pétrole et gaz)¹.

De leur côté, les ménages déterminent leur consommation en chaque bien et service en fonction de leur revenu et du prix relatif de ces biens et services, en tenant compte d'éventuelles consommations incompressibles (par exemple les biens de première nécessité). ThreeME intègre en outre une modélisation selon une approche technico-économique des décisions d'investissements des ménages dans le logement et d'achat de véhicules. Ainsi, le bloc logement distingue sept classes de logement, en fonction de leurs coûts de production, de leur facture énergétique et de leurs coûts de rénovation. L'évolution de la composition du parc de logements va dépendre des coûts d'entretien (dont les dépenses énergétiques) relativement aux coûts de rénovation, lesquels sont fonction de la structure de financement (aides publiques, autofinancement et endettement).

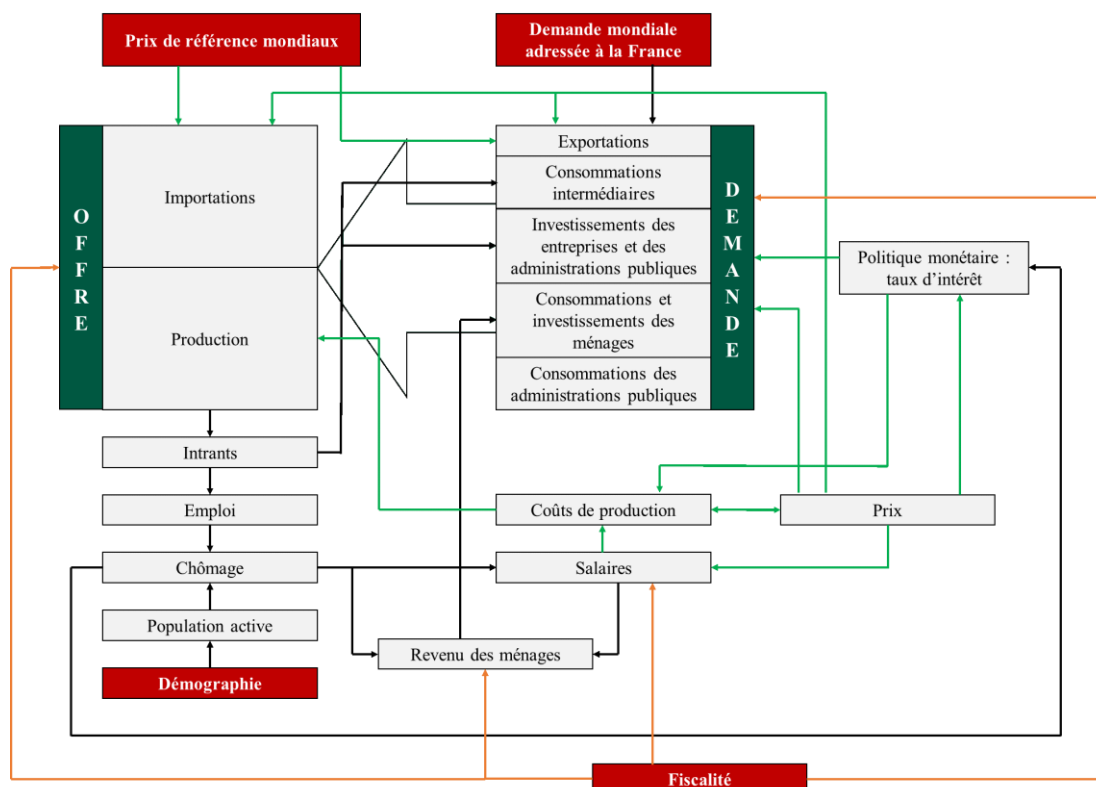
De manière analogue, le bloc automobile distingue deux types de véhicules (thermiques et électriques), chacun réparti en sept classes en fonction de leur classe énergétique. Le choix entre véhicules thermiques et électriques dépend d'un modèle d'innovation/imitation où les ménages choisissent leur véhicule en fonction des coûts relatifs, mais aussi sur la base du nombre de ménages utilisant déjà un type de véhicules.

Dans le modèle ThreeME, un prix du carbone, à partir duquel la valeur de l'action pour le climat peut ensuite être inférée, peut être simulé de sorte à atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES provenant de la consommation énergétique et des processus industriels.

Du côté des entreprises, une hausse du prix du carbone sur le pétrole incite à la fois à diminuer la demande en pétrole au profit des trois autres sources d'énergie (deuxième niveau de la fonction de production) et à substituer les autres facteurs de production à l'énergie (premier niveau de la fonction de production).

¹ Un secteur produit du charbon, deux du pétrole (pétrole et bio-carburant), huit de l'électricité (nucléaire, pétrole, gaz, charbon, éolien, solaire, hydraulique et cogénération) et six du gaz (gaz naturel, bois, biogaz, incinération de déchets, géothermie et cogénération).

Schéma A3 – Représentation synthétique du modèle ThreeME



Note : les encadrés gris désignent des groupes de variables endogènes, les encadrés orange des variables exogènes ; les flèches noires désignent l'impact de variables réelles, les flèches vertes de variables nominales et les flèches orange de variables fiscales ; la grande flèche verte représente la prépondérance de la demande sur l'offre à court terme.

Source : DG Trésor

Du côté des ménages, une hausse du prix du carbone renchérit le coût d'entretien des classes de logements les plus énergivores et accroît le bénéfice de la rénovation. Dans une approche similaire, une hausse du prix du carbone accroît le bénéfice d'un achat de véhicule électrique.

Ainsi, ThreeME détermine le signal-prix du carbone incitant les ménages et les entreprises à décarboner leurs consommations et leurs productions, en supposant la décarbonation du bouquet énergétique donnée. Il est de plus cohérent avec les objectifs de réduction des émissions de carbone de la SNBC 3, exprimés en flux.

Les émissions issues de l'élevage et des cultures, ainsi que les puits de carbone naturels (UTCATF), le captage du carbone dans l'air (DACCS) et la combinaison de bioénergie et de piégeage et stockage de carbone (BECCS), ne sont pas pris en compte.

3. Le modèle Vulcain : une approche macroéconomique stylisée

Le modèle Vulcain est un modèle d'évaluation intégrée (IAM). Sa structure aussi simple que possible permet de représenter les principaux mécanismes macroéconomiques relatifs à la transition énergétique sur le long terme, en se plaçant dans un contexte international¹.

Le modèle se décompose en trois modules : un équilibre économique statique, une dynamique économique à la Solow et une dynamique climatique.

L'équilibre économique statique dans Vulcain

La partie économique de Vulcain consiste en un modèle macroéconomique de type EGC (*équilibre général calculable*). Il ne contient pas d'information explicite sur les technologies existantes ou à venir, à la différence du modèle TiTAN, mais peut en revanche décrire les interactions entre secteurs économiques, l'équilibre entre les demandes et les offres des facteurs de production, ainsi que les échanges commerciaux avec le reste du monde.

L'apport essentiel de ce modèle réside dans sa prise en compte des interactions à l'échelle internationale. Chaque zone géographique (la France, le reste de l'Union européenne et le reste du monde) est modélisée de manière identique, est en relation commerciale avec les autres et peut mettre en œuvre des politiques climatiques divergentes.

Le découpage sectoriel croise deux dimensions : l'exposition à la concurrence internationale et le type d'énergie consommée par le secteur. Le croisement de ces deux dimensions amène ainsi à définir quatre biens², de façon symétrique : deux biens exposés, un « brun » dont la production mobilise des combustibles fossiles et un « vert » dont la production mobilise de l'électricité (au contenu carbone non nul), et deux biens abrités, un brun et un vert également. Le module économique contient également la représentation d'un secteur extractif produisant une énergie fossile, et d'un secteur de production d'électricité mobilisant différentes sources : le nucléaire, l'énergie renouvelable et l'énergie fossile.

Ainsi, le découpage sectoriel retenu permet de rendre compte des principaux mécanismes de la transition énergétique : 1) la baisse des consommations énergétiques par les consommateurs et les producteurs lorsque le prix de l'énergie se renchérit, notamment du

¹ Dans l'esprit des recommandations émises par le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz (2023) : « La bonne méthode est sans doute de construire des modèles simplifiés (*toy models*) pour représenter spécifiquement les mécanismes économiques fondamentaux à l'œuvre dans la décarbonation [...] ». Voir France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat*, rapport à la Première ministre, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, mai.

² Étant entendu qu'en réalité, il en existe un continuum, caractérisés par des niveaux d'exposition à la concurrence internationale et des contenus en carbone extrêmement variés.

fait de politiques de tarification du carbone ; 2) l'électrification de l'économie via la substitution de l'énergie électrique à l'énergie fossile ; 3) la décarbonation du mix électrique¹.

La structure du module économique repose sur des fonctions d'utilité et de production de type CES (*Constant elasticity of substitution*) imbriquées, que les agents maximisent, sous contrainte de budget pour les ménages, et sous contrainte de technologie de production pour les entreprises. La structure détaillée du modèle est présentée en figure A4 de l'[Annexe 6](#).

La dynamique économique et climatique dans Vulcain

Sur la base de l'équilibre économique statique, le modèle Vulcain inclut une modélisation économique dynamique permettant d'effectuer des simulations à un horizon 2050, voire plus lointain. Dans ce module, le stock de capital suit une dynamique récursive : chaque année le capital existant est en partie déprécié, tandis que l'épargne de l'année précédente vient s'ajouter au stock.

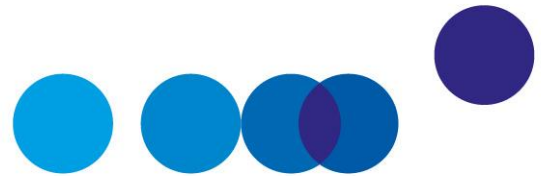
Par ailleurs, un module de dynamique climatique avec rétroaction économique permet de mieux objectiver les gains économiques à long terme associés aux politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le module est basé sur le code du modèle DICE 2023².

La valeur de l'action pour le climat dans Vulcain

Dans chacune des trois régions, la décarbonation est menée en introduisant un marché de quotas d'émissions sur l'ensemble de l'économie, et en limitant chaque année le nombre de quotas mis aux enchères conformément aux trajectoires de décarbonation définies ci-dessus. Les recettes de la mise aux enchères des quotas sont reversées forfaitairement aux ménages de chaque région. Dans le secteur brun abrité, les quotas sont additifs à la fiscalité fossile existante.

¹ Ces trois mécanismes peuvent être mis en regard, dans une certaine mesure, de ceux identifiés par Mahfouz et Pisani-Ferry (2022) : la modération des usages et des consommations, la substitution du capital à des combustibles fossiles (conséquence de l'électrification), la redirection du progrès technique vers les énergies non carbonées et l'efficacité énergétique.

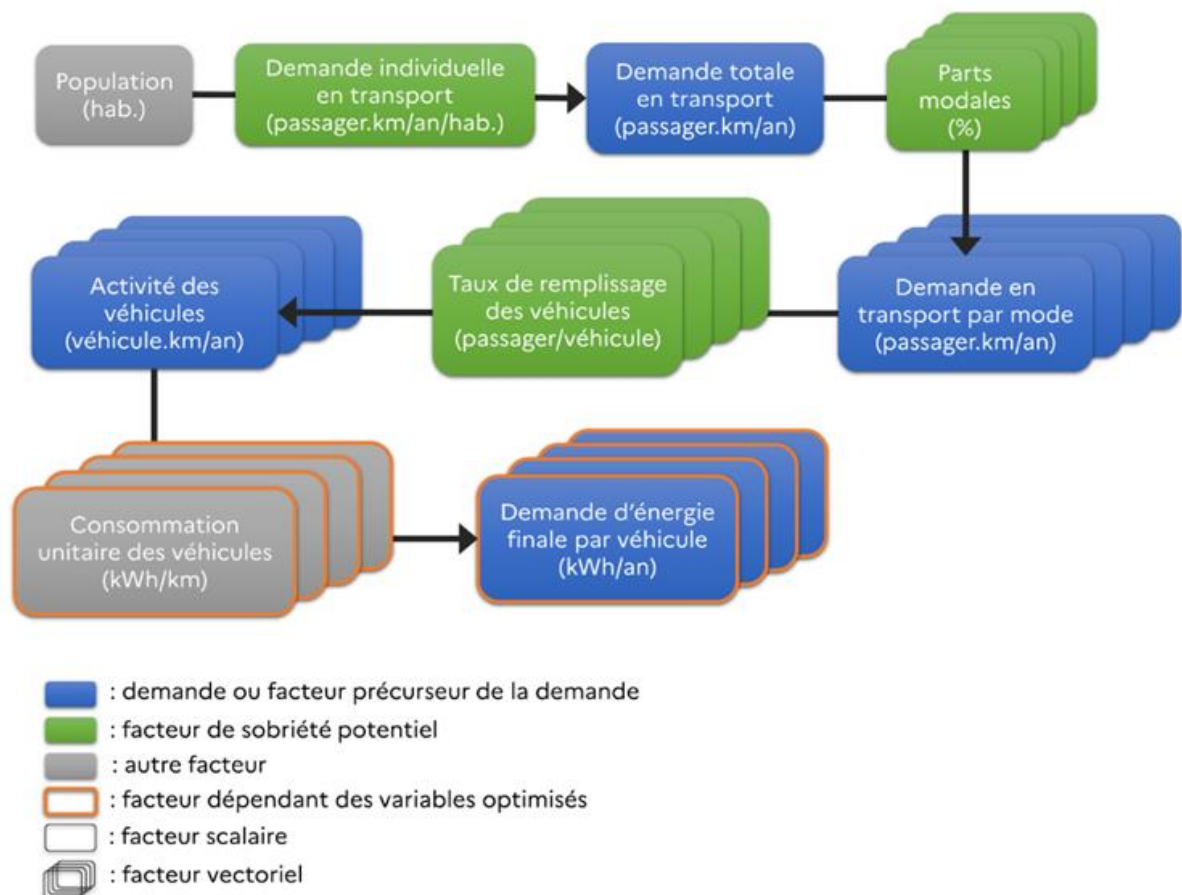
² Barrage L. et Nordhaus W. (2024), « [Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 121(13), mars.



ANNEXE 6

COMPLÉMENTS SUR LE MODÈLE TITAN

Schéma A4 – Schéma simplifié du calcul de la demande d'énergie dans TiTAN, exemple du transport de passagers



Source : CGDD, modèle TiTAN

Tableau A1 – Panorama des hypothèses de demande dans la variante « avec sobriété » et la variante « sans sobriété » des scénarios TITAN

Secteur	Champ	Variante « avec sobriété »	Variante « sans sobriété »
Bâtiment	Chauffage	Part croissante de ménages « consciencieux » se chauffant 1 °C de moins que la population générale	Part constante
		Part décroissante de ménages précaires se sous-chauffant	Part constante
		Température de consigne générale abaissée de 19 °C à 18 °C	Température de consigne constante
	Climatisation	Température de consigne relevée de 22 °C à 26 °C	Température de consigne constante
	Autres usages	Baisse de la demande individuelle d'énergie utile pour la cuisson, l'ECS, l'électricité spécifique	Demande constante
	Logement	Croissance ralentie de la part des maisons individuelles	Croissance tendancielle
Baisse ralentie du nombre moyen d'habitants par logement		Baisse tendancielle	
Transport	Passagers	Report modal vers les mobilités douces et les transports en commun	Parts modales constantes
		Augmentation du taux de remplissage des véhicules	Taux constant
		Croissance modérée de la demande en mobilité	Croissance forte
	Fret	Croissance modérée de la demande en fret	Croissance forte
		Augmentation du taux de remplissage des véhicules	Taux constant
		Report modal des poids lourds vers le fret ferroviaire et fluvial	Parts modales constantes
Soutes internationales	Croissance maîtrisée du trafic aérien	Croissance tendancielle	
Industrie	Toutes filières	Hypothèse de réindustrialisation forte	idem
	Pétrochimie, aluminium, acier	Augmentation du taux d'incorporation de matériaux recyclés	Taux constant

Source : commission



BIBLIOGRAPHIE

- Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hemous D. (2012), « [The environment and directed technical change](#) », *American Economic Review*, n° 102(1), p. 131-166.
- Affaire du siècle (2023), « [L’Affaire du Siècle : 4 ans de procédures pour que l’Etat réponde à l’urgence climatique](#) », dossier de presse du 23 juin.
- AIE (2024), [World Energy Outlook 2024](#), Agence internationale de l’énergie, octobre.
- AIE (2023), [Energy Technology Perspectives 2023](#), Agence internationale de l’énergie, janvier.
- AIE (2023), [Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach](#), rapport, Agence internationale de l’énergie, septembre.
- AIE (2021), [Net Zero 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector](#), rapport, Agence internationale de l’énergie, mai.
- Allen T., Dees S., Boissinot J., Mateo Caicedo Graciano C., Chouard V., Clerc L., de Gaye A., Devulder A., Diot S., Lisack N., Pegoraro F., Rabaté M., Svartzman R. et Vernet L. (2020), « [Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: an Application to France](#) », Working Paper n° 774, Banque de France, juillet.
- Barrage L. et Nordhaus W. (2024), « [Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 121(13), mars.
- Bastien-Olvera B. A. et Moore F. C. (2021), « Use and non-use value of nature and the social cost of carbon », *Nature Sustainability*, vol. 4(2), février, p. 101-108.
- BEI (2023), [The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB - 2nd Edition](#), Banque européenne d’investissement, mars.
- BEI (2020), [Feuille de route du Groupe BEI dans son rôle de banque du climat 2021-2025](#), Banque européenne d’investissement, novembre.
- Bilal A. et Känzig D. R. (2024), « The Macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature », NBER Working Paper n° 32450, National Bureau of Economic Research, mai.
- Blanchard O. et Tirole J. (2021), [Les grands défis économiques](#), rapport de la commission internationale, juin.

- Boullot M., Girard P.-L. et Tokay N. (2024), *Présentation du module Mésange vert*, Direction générale du Trésor, Document de travail n° 2024/4.
- Cai Y., Judd K. L., Lenton T. M., Lontzek T. S. et Narita D. (2015), « [Environmental tipping points significantly affect the cost-benefit assessment of climate policies](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112(15), avril, p. 4606-4611.
- Centre d'analyse stratégique (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, rapport de la mission présidée par Christian Gollier, Paris, La Documentation française.
- Centre d'analyse stratégique (2008), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.
- CGDD (2023), *Chiffres clés du climat. France, Europe, Monde – Édition 2023*, Commissariat général au développement durable, octobre.
- Chakravorty U., Magné B. et Moreaux M. (2006), « A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution », *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 30, p. 2875-2904.
- Commissariat général du Plan (2001), *Transports. Choix des investissements et coûts des nuisances*, rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, juin.
- Citepa (2024), « [Affaire du siècle : même si le tribunal constate que l'Etat n'a pas complètement exécuté sa décision de 2021, il rejette la demande de mesures d'injonction](#) », article du 24 avril.
- Citepa (2024), *Rapport Secten 2024*.
- Climate Change Committee (2025), *The Seventh Carbon Budget: Advice for the UK Government*, février.
- de Gaye A. et Payerols C. (2024), « [Nouveaux scénarios NGFS \(phase 4\) : impacts économiques pour la France](#) », Billet de blog n° 355, la Banque de France, mai.
- Delahais A. et Robinet A. (2023), « [Coûts de l'inaction face au changement climatique en France : que sait-on ?](#) », Document de travail, n° 2023-01, France Stratégie, mars.
- DGE et DGEC (2024), *L'état des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France*, Direction générale des Entreprises et Direction générale de l'Énergie et du Climat, juillet.
- DG Trésor (2025), *Rapport final. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, janvier.
- DG Trésor (2023), *Rapport intermédiaire. Les enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone*, Direction générale du Trésor, décembre.
- Dietz S., Rising J., Stoerk T. et Wagner G. (2021), « [Economic impacts of tipping points in the climate system](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118(34), août.
- Dietz S. et Venmans F. (2019), « [Cumulative carbon emissions and economic policy: In search of general principles](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 96(C), p. 108-129.

- Divialle J. et Fouquet M. (2024), « [Une tarification des émissions de gaz à effet de serre inégale selon les secteurs](#) », *Théma Essentiel – Climat*, CGDD, décembre.
- Drupp M. A. et Hänsel M. C. (2021), « Relative prices and climate policy: How the scarcity of nonmarket goods drives policy evaluation », *American Economic Journal: Economic Policy*, vol. 13(1), février, p. 168-201.
- Dussaux D. (2020), *The joint effects of energy prices and carbon taxes on environmental and economic performance: Evidence from the French manufacturing sector*, OECD Environment Working Papers, n°154.
- EGUsphere. AEE (2024), *European Climate Risk Assessment*, rapport, Agence européenne de l'environnement, mars.
- EPA (2023), *Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances*, U.S. Environmental Protection Agency, novembre.
- EPA (2017), *Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan: Proposal*, U.S. Environmental Protection Agency, octobre.
- Fontagné L., Martin P. et Orefice G. (2023), *The Many Channels of Firm's Adjustment to Energy Shocks: Evidence from France*, Banque de France, Document de travail n° 929.
- France Stratégie (2024), *Les coûts d'abattement. Partie 7 – Acier*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, octobre.
- France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat*, rapport à la Première ministre, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, mai.
- France Stratégie (2023), *Les incidences économiques de l'action pour le climat. Sobriété*, rapport thématique coordonné par Aude Pommeret, mai.
- France Stratégie (2023), *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*, rédigé sous l'autorité du comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics présidé par Robert Guesnerie.
- France Stratégie (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, novembre.
- France Stratégie (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, mai.
- France Stratégie (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 3 – Électricité*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, janvier.
- France Stratégie (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 2 – Transports*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, juin.
- France Stratégie (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

- GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, mars.
- GIEC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers – Headline Statements*, mars.
- GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe III, avril.
- GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Technical Summary*, avril.
- GIEC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers*, avril.
- GIEC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, sixième rapport du GIEC, contribution du groupe I, août.
- GIEC (2014), *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*, cinquième rapport du GIEC, contribution du groupe I.
- Global Carbon Project (2023), *Fossil CO₂ emissions at record high in 2023*, rapport, décembre.
- Gollier C. (2024), « *The cost-efficiency carbon pricing puzzle* », *TSE Working Paper*, n° 952, Toulouse School of Economics, mai.
- Gourmand L. (2024), « *Quels besoins d'investissements pour les objectifs français de décarbonation en 2030 ?* », *Trésor-Éco*, n° 342, avril.
- Gouvernement (2024), *Projet de Stratégie nationale bas-carbone n° 3. Premières grandes orientations à l'horizon 2030 et enjeux à l'horizon 2050*, novembre.
- Gouvernement britannique (2021), « *Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation* », *Policy Paper*, septembre.
- Hausfather Z. (2019), « *Explainer: The high-emissions "RCP8.5" global warming scenario* », *CarbonBrief.org*, article du 21 août.
- Henriet F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), « *A stylized applied energy-economy model for France* », *The Energy Journal*, vol. 35(4), p. 1-38.
- HCC (2024), *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*, rapport annuel, Haut Conseil pour le climat, juin.
- Hotelling H. (1931), « *The economics of exhaustible resources* », *Journal of Political Economy*, vol. 39(2), avril, p. 137-175.
- IGN (2024), *Inventaire forestier national*, Institut national de l'information géographique et forestière, octobre.

- IGN (2023), *Inventaire forestier national*, Institut national de l'information géographique et forestière, octobre.
- IGN et FCBA (2024), *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français*, rapport d'études, mai.
- Institut Avant-Garde (2024), *Dettes climatiques : associer les soutenabilités climatiques et budgétaires*, rapport, juin.
- Kaminski I. (2024), « [Brazilian rancher ordered to pay \\$50m for damage to Amazon](#) », *The Guardian*, article du 25 juillet.
- Larrieu S. et Roux S. (2020), « [Peut-on prendre en compte le climat dans les comptes nationaux ? L'épargne nette ajustée des effets liés au climat est négative en France](#) », dans Insee (2020), *Comptes nationaux. Espace thématiques*, coll. « Insee Références », décembre.
- Lemoine D. et Traeger C. P. (2016), « Economics of tipping the climate dominoes », *Nature Climate Change*, vol. 6, p. 514-519.
- Ley M., Stucki T. et Woerter M. (2016), « The impact of energy prices on green innovation », *The Energy Journal*, vol. 37(1), p. 41-76.
- Maison Blanche (2025), « [Unleashing American Energy](#) », Executive Order n° 3418, 3 février.
- Moore F. C., Drupp M. A., Rising J., Dietz S., Rudik I. et Wagner G. (2024), « Synthesis of evidence yields high social cost of carbon due to structural model variation and uncertainties », NBER Working Paper n° 32544, National Bureau of Economic Research, juin.
- NGFS (2022), *NGFS Climate Scenarios for Central Bankers and Supervisors*, Network for Greening the Financial System, septembre.
- Nordhaus W. (2019), « [Economics of the disintegration of the Greenland ice sheet](#) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116(25), juin, p. 12261-12269.
- O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L. et al. (2017), « [The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century](#) », *Global Environmental Change*, n° 42, janvier, p. 169-180.
- Otto A., Todd B. J., Bowerman N., Frame D. J. et Allen M. R. (2013), « [Climate system properties determining the social cost of carbon](#) », *Environmental Research Letters*, vol. 8(2), juin.
- Papageorgiou C., Saam M. et Schulte P. (2017), « Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 99(2), p. 281-290.
- Pommeret A. (2024), « [Commentaire – Le défi du siècle et la science économique](#) », *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, n° 544, décembre.

- Rennert K., Errickson F., Prest B. C. *et al.* (2022), « [Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂](#) », *Nature*, n° 610, septembre, p. 687-692.
- Stechemesser A., Koch N., Mark E., Dilger E., Klösel P., Menicacci L., Nachtigall D., Pretis F., Ritter N., Schwarz M., Vossen H. et Wenzel A. (2024), « [Climate policies that achieved major emission reductions : Global evidence from two decades](#) », *Science*, vol. 385(6711), août, p. 884-892.
- Stern N. (2006), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Stern T. et Persson M. U. (2008), « [An even sterner review: Introducing relative prices into the discounting debate](#) », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 2(1), hiver, p. 61-76.
- Tol R. S. J. (2023), « Social cost of carbon estimates have increased over time », *Nature Climate Change*, vol. 13, p. 532-536.
- United States Environmental Protection Agency (2025), « [Climate Change Indicators: Greenhouse Gases](#) », février.
- Vailles C. (2021), « [D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du GIEC ?](#) », I4CE, Billet d'analyse, septembre.
- van der Ploeg F. (2021), « [Carbon pricing under uncertainty](#) », *International Tax and Public Finance*, vol. 28, juillet, p. 1122-1142.
- Veld J., Roeger W. et Varga J. (2021), *E-QUEST - A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy: Model Description and Applications to Reach the EU Climate Targets*, Commission européenne, Discussion Paper n° 146.
- Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et de Gouvello C. (2014), « [Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil](#) », Policy Research Working Paper, n° WPS 6808, World Bank Group, mars.
- Weitzman M. L. (2010), « What is the “damages function” for global warming –And what difference might it make? », *Climate Change Economics*, vol. 1(1), p. 57-69.



Directeur de la publication

Clément Beaune, commissaire général

Directeur de la rédaction

Cédric Audenis, commissaire général adjoint

Secrétaires de rédaction

Olivier de Broca, Gladys Caré

Contact presse

Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Institution autonome placée auprès du Premier ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.