



Prix social du carbone et engagement pour le climat : des pistes pour une comptabilité économique environnementale ?

Enrichir la comptabilité nationale d'indicateurs de soutenabilité environnementale est une question ancienne qui, à ce stade, n'a pas encore reçu de réponse opérationnelle partagée. Le point de blocage principal est la difficulté à traduire les atteintes à l'environnement dans des termes monétaires commensurables au PIB. Pour le cas particulier du climat, une autre approche possible revient à se fixer *ex ante* une cible tutélaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre à un horizon donné, puis à mesurer l'effort à fournir pour atteindre cette cible de manière équitable, sur la base de nos connaissances sur les coûts des techniques de décarbonation. L'effort ainsi défini se traduit par une dépense climat optimale, dépense au sens large pouvant être portée par l'ensemble des agents économiques (publics et privés).

Nous appliquons ici cette méthode à la France, qui a fixé dans la loi une cible de neutralité carbone en 2050. D'après la modélisation retenue dans cette étude, atteindre cette cible nécessiterait, dans notre scénario central, de porter la dépense pour le climat à 4,5 % du PIB par an chaque année jusqu'en 2050, contre une dépense effective estimée à environ 1,9 % aujourd'hui. Une analyse de sensibilité suggère que cette dépense climat optimale peut varier entre 3,4 % et 6,9 % du PIB environ, selon les hypothèses d'efficacité énergétique retenues.

Cette sensibilité aux hypothèses de modélisation ne place pas de tels chiffres sur le même plan que les grandeurs statistiques usuelles, directement issues de l'observation de l'état courant de l'économie. Ces chiffres n'en éclairent pas moins une réalité, celle d'un engagement pour le climat, dont l'ordre de grandeur en cumulé jusqu'à 2050 serait de 150 % du PIB annuel actuel dans notre hypothèse centrale, ou 85 % si on raisonne en écart à ce que donnerait le maintien du taux d'effort actuel. De ces chiffres peut également découler une estimation du prix social du carbone dans la lignée des résultats de la commission Quinet en 2019, qui pourrait elle-même nourrir d'autres indicateurs : une valorisation monétaire des émissions passées ou un indicateur d'épargne nette ajustée du coût social des émissions de gaz à effet de serre.

Jean-Marc Germain, Thomas Lellouch (Insee)

L'augmentation de la température mondiale est aujourd'hui très nette (*figure 1*). L'écart par rapport à la moyenne de la période de référence préindustrielle 1850-1900 est faiblement marqué jusqu'au milieu des années 1930, puis devient légèrement positif jusqu'au milieu des années 1970 avant d'augmenter nettement depuis. Sur les 30 dernières années, la température

mondiale a augmenté de près de 0,2 °C (degré Celsius) en moyenne par décennie. Le réchauffement climatique s'accompagne d'autres phénomènes naturels importants, comme l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans ou la diminution de leur teneur en oxygène dissous.

Les causes du changement climatique sont dorénavant clairement établies par

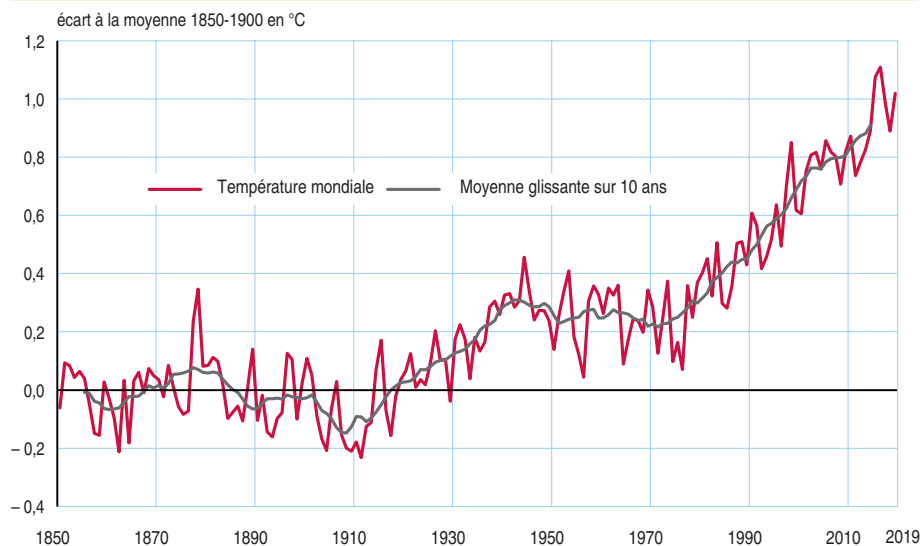
la communauté scientifique internationale. D'un point de vue physique, c'est la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (GES) qui réchauffe la terre en piégeant et en réfléchissant vers le sol une partie du rayonnement infrarouge initialement émis par la surface terrestre suite au rayonnement solaire. Si l'effet de serre constitue un phénomène naturel indispensable à la

vie terrestre, les activités humaines ont considérablement amplifié son impact, avec notamment l'explosion des émissions de GES depuis la seconde moitié du 20^e siècle. Hors **utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF)**, les émissions annuelles brutes mondiales de GES sont passées de 24,3 GtCO₂eq en 1970 à 51,2 GtCO₂eq en 2018 (*figure 2*), soit une augmentation de plus de 110 % en moins de 50 ans. La tendance mondiale est à la hausse malgré une stagnation en 2019 et une baisse en 2020 du fait de la crise de la Covid-19 ; baisse très probablement temporaire car uniquement due à la réduction exceptionnelle d'activité économique. Les évolutions sont très variées selon les différentes régions du monde : les émissions ont baissé de près de 20 % entre 1970 et 2018 dans l'Union européenne et ont augmenté modérément aux États-Unis (+ 13 % sur la même période) ; elles ont en revanche explosé dans certains pays émergents, notamment en Chine (+ 580 % sur la même période) qui est devenu le pays le plus émetteur de la planète en termes absolus.

Le réchauffement climatique va induire des dommages sur les sociétés humaines et les milieux naturels, avec des risques de dommages irréversibles. Ces dommages se manifestent sous de très nombreuses formes, allant de l'augmentation des événements climatiques extrêmes à la baisse de la productivité du travail en passant par des risques de conflits potentiellement violents fondés sur l'accès aux ressources. Plusieurs scénarios de réchauffement ont été testés par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et les risques deviennent très élevés dans les scénarios impliquant une augmentation de la température au-delà de 2 °C par rapport à la période préindustrielle. Ces risques sont généralement plus grands pour les pays à faible revenu.

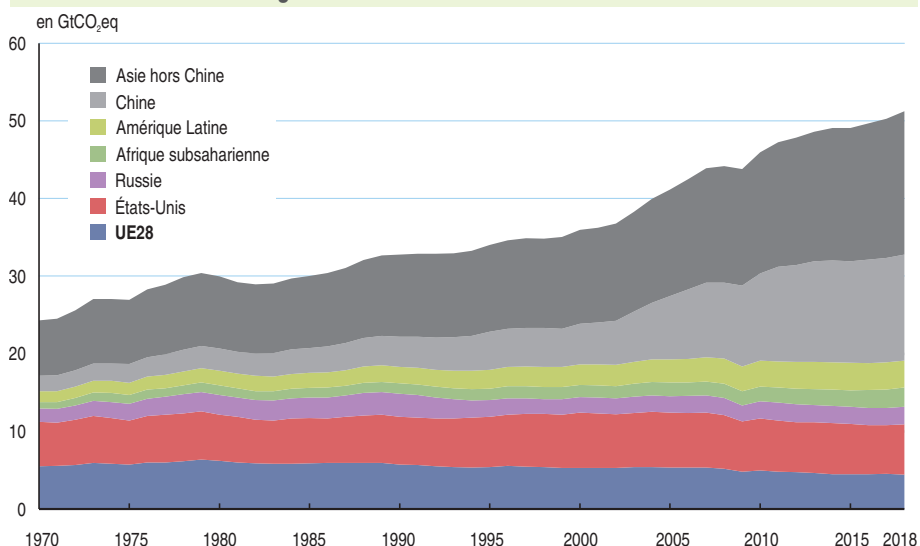
La situation est déjà particulièrement critique puisque, la plupart des GES mettant très longtemps à se dissoudre dans l'atmosphère, les émissions d'aujourd'hui vont affecter le climat pendant tout le siècle prochain au moins. D'après le dernier rapport du GIEC, la concentration actuelle est telle que nous sommes déjà à une augmentation de 1,1 °C par rapport à l'ère préindustrielle. « Inverser » le mouvement supposerait d'avoir des émissions nettes négatives, à savoir que les **puits de carbone** naturels de la planète (forêts, océans) et les technologies d'élimination du dioxyde de carbone (captage et stockage) soient supérieurs au flux d'émissions brutes d'origine anthropique (*i.e.* d'origine humaine). À ce stade, c'est très loin d'être le cas.

1 Évolution de la température mondiale



Source : Hadley Center ; calculs des auteurs.

2 Émissions mondiales de gaz à effet de serre



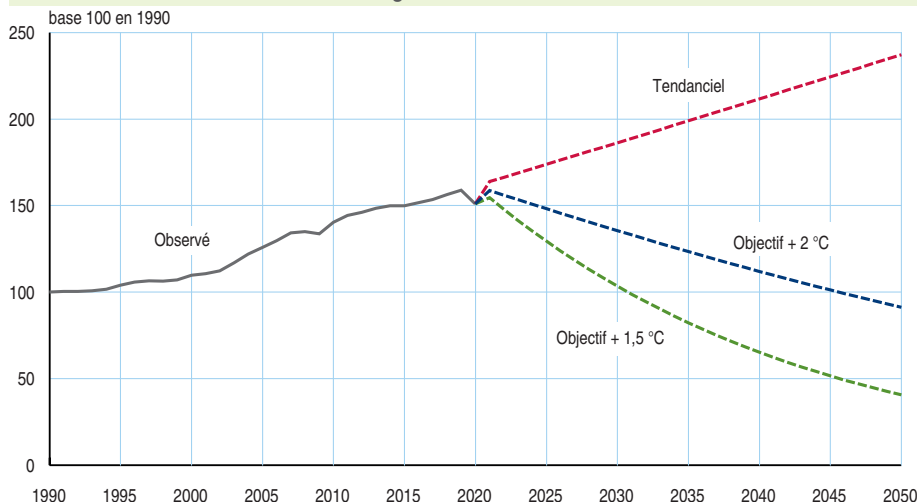
Source : base de données Edgar ; calculs des auteurs.

Les tendances d'émissions de GES sont très loin de respecter les objectifs fixés au niveau mondial

Le contexte mondial de lutte contre le changement climatique a été considérablement renforcé ces dernières années (*encadré 1*). En particulier, l'accord de Paris en 2015 prévoit de limiter l'élévation de la température moyenne de la planète « nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ». Respecter l'accord de Paris revient donc à se donner un niveau de concentration maximum de GES à ne pas dépasser : autrement dit, cela définit l'existence d'un **budget carbone** au niveau mondial, correspondant à la quantité maximale de GES d'origine anthropique pouvant être émise dans le futur. Or, en l'état, les tendances d'émissions de GES sont très loin de respecter les objectifs fixés au niveau mondial et le budget

carbone est déjà en épuisement rapide. D'après le GIEC, il restait au 1^{er} janvier 2018 un budget carbone de 570 GtCO₂eq (respectivement 1 170 GtCO₂eq) pour une probabilité de 66 % de parvenir à limiter le réchauffement planétaire à + 1,5 °C (respectivement + 2 °C). La poursuite des tendances actuelles, conduirait à dépasser ce budget carbone dès l'année 2032 (respectivement 2045), sous l'hypothèse d'une croissance en volume du PIB mondial de 2,5 % par an en moyenne sur 2020-2050 (mais avec un ralentissement progressif sur la période) et d'un recul de l'**intensité carbone** de l'ordre de 1,1 % par an en phase avec les récentes évolutions. On se placerait alors dans un scénario de température largement au-delà des + 2 °C prévus par l'accord de Paris (*figure 3*), avec par conséquent des risques très importants de dommages irréversibles sur les sociétés humaines et les milieux naturels. Les

3 Scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre



Lecture : en 2050, le prolongement des tendances actuelles impliquerait des émissions à hauteur de 237 % du niveau de 1990, tandis que le respect de la cible de + 2 °C conduirait à des émissions en 2050 à hauteur de 91 % du même niveau.
Source : base de données Edgar ; calculs des auteurs.

trajectoires actuelles d'émissions ne sont donc pas soutenables sur le plan climatique, au sens où elles sont incompatibles avec le respect des engagements internationaux. Respecter les cibles supposerait de réduire massivement les émissions de GES par rapport aux tendances actuelles. À titre d'exemple, il faudrait réduire les émissions mondiales de GES de plus de 5 % par an pour parvenir à la **neutralité carbone** en 2050. En dehors de périodes très exceptionnelles et probablement limitées dans le temps comme celle de la crise de la Covid-19 et la chute du PIB mondial qu'elle entraîne, ce seuil est hors de portée sans une transformation majeure des modes de production et des habitudes de consommation.

Le problème appelle une régulation de la puissance publique, avec des cibles nationales ambitieuses et équitables

Il convient de rappeler que l'équilibre climatique de la planète est un bien public mondial qui appelle une régulation publique, aux niveaux local, national, continental et

mondial. En premier lieu, émettre des GES constitue une consommation de ce bien, avec une externalité négative pour tous les agents économiques (ménages, entreprises, acteurs publics). Cette externalité présente une dimension mondiale, dans la mesure où, quelle que soit l'origine géographique de l'émission, elle concerne toute la planète. De ce point de vue, le budget carbone est exposé à la « tragédie des communs » [Hardin, 1968] : dans une situation de compétition pour un accès à une ressource commune limitée, la stratégie individuellement rationnelle conduit à surexploiter la ressource. En second lieu, la qualité du climat dépend du stock de concentration des GES dans l'atmosphère, si bien qu'elle dépend davantage de l'accumulation passée et future que du flux courant d'émissions. Ainsi, dans la mesure où les générations futures seront les plus impactées par les émissions actuelles, de surcroît dans un degré incertain, une tragédie des horizons [Carney, 2015] vient s'ajouter à la tragédie des communs. Cette double tragédie impose des efforts de régulation et de coordination internationale s'inscrivant dans

le temps long et visant le bien-être des générations futures.

Le respect des accords de Paris suppose la définition de cibles nationales ambitieuses et le respect concomitant de ces cibles par tous les pays, ou à tout le moins par les plus gros émetteurs. De fait, si l'enjeu est mondial, les marges de manœuvre pour impulser les politiques d'atténuation sont essentiellement nationales, à travers les outils traditionnels de politique économique, comme la réglementation, la fiscalité ou les investissements publics qui relèvent souvent des compétences des États. La coopération internationale, dans la recherche notamment, peut également être un levier. En tout état de cause, un mécanisme efficace de coordination internationale est nécessaire pour répartir de manière juste et équitable le budget carbone mondial. La difficulté réside dans le fait de pouvoir tenir compte à la fois des responsabilités passées des pays occidentaux dans le stock de GES actuel, et des spécificités géographiques et énergétiques de chacun.

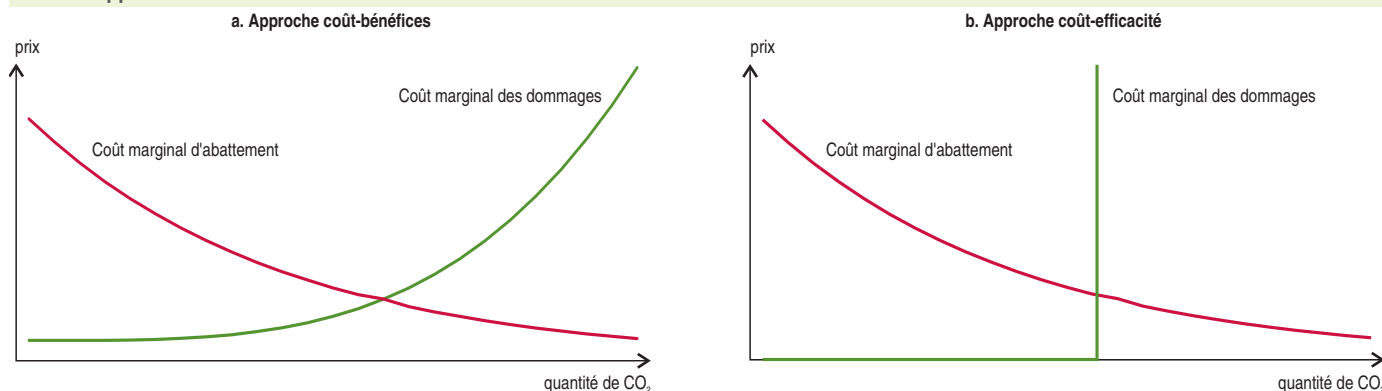
Définir la trajectoire optimale de réduction des émissions

Trois facteurs sont à prendre en compte pour définir ce que serait une trajectoire optimale de réduction des émissions : la cible climatique, les technologies de décarbonation et une règle de répartition intertemporelle de l'effort qui va définir le rythme optimal de mise en œuvre de ces technologies.

Définir la cible, c'est définir le niveau optimal d'émissions à un certain horizon, ici fixé à 2050. Pour cela, il y a essentiellement deux méthodes : l'approche coût-bénéfices et l'approche coût-efficacité.

L'approche coût-bénéfices est la plus naturelle d'un point de vue économique, puisque la cible optimale d'émissions est endogène et déterminée par la comparaison du coût des dommages causés par les émissions avec le coût d'abattement permettant de les éviter (*figure 4a*). Il s'agit donc

4 Deux approches



Lecture : la *figure 4a* montre la forme des courbes de coût marginal des dommages (croissant avec la quantité de CO₂ émis) et d'abattement (décroissant avec la quantité de CO₂ émis, avec l'idée que les technologies sont de plus en plus chères à mesure que l'on avance dans la décarbonation). Sur la *figure 4b*, le coût des dommages devient infini à partir d'un certain seuil d'émission, correspondant à l'épuisement du budget carbone.

d'expliciter précisément la fonction de dommages en réalisant un bilan global actualisé des dommages induits à court, moyen et long terme par l'émission d'une tonne de CO₂, ce qui est très difficile à mettre en œuvre en pratique. Il y a en effet une très forte incertitude sur la valorisation monétaire des dommages climatiques : il existe des coûts marchands (érosion de la productivité, baisse des rendements agricoles, destruction de capital productif), mais également des coûts non marchands (perte de biodiversité, destruction d'écosystèmes, etc.), ces derniers étant, plus encore que les premiers, très difficiles, voire impossibles, à valoriser correctement. Par ailleurs, les dommages sont étalés dans le temps, et, au-delà des dommages marginaux, il y a un risque de dommages graves et irréversibles qui n'est pas pris en compte dans cette approche. Par conséquent, le plus souvent, les dommages sont sous-estimés, ce qui conduit à des cibles climatiques optimales loin du consensus scientifique actuel. Ainsi, d'après la fonction de dommages du modèle DICE [Nordhaus, 1992], l'optimum climatique serait atteint pour une température de l'ordre de + 4 °C par rapport aux niveaux préindustriels, ce qui semble particulièrement optimiste, notamment au regard des derniers travaux du GIEC. L'approche coût-efficacité apparaît plus conforme à la volonté de la communauté internationale incarnée par l'accord de Paris qui fixe un objectif de limitation de l'élévation de la température, et par conséquent impose un plafond d'émissions de GES à un certain horizon temporel. Cette approche consiste à se fixer *ex ante* un objectif tutélaire exogène de réduction des émissions en fonction des engagements climatiques existants. La fonction de dommage est donc définie implicitement par l'objectif au sens où le dommage est supposé devenir infini ou échapper à toute quantification si la cible est dépassée (figure 4b). C'est notamment cette méthode qui a été utilisée dans le rapport de la commission Quinet [2019].

La difficile question de la valorisation des dommages étant ainsi écartée par la définition *ex ante* d'un objectif de réduction d'émission, c'est l'évolution des technologies de décarbonation de l'économie qui devient une hypothèse centrale du modèle. Pour ce faire, l'approche microéconomique et paramétrique apparaît particulièrement utile, notamment dans la mesure où nombre de technologies qui mènent à la neutralité carbone sont déjà connues. Cette méthode consiste à analyser, pour chaque technologie (isolation des logements, éolien en mer, voiture à hydrogène, etc.), le coût d'abattement, à savoir le ratio entre l'ensemble des coûts de mise en œuvre et le total des émissions évitées par l'utilisation de la nouvelle technologie. Par exemple, le modèle développé en France par le

Encadré 1 Engagements climatiques aux niveaux international, européen et national

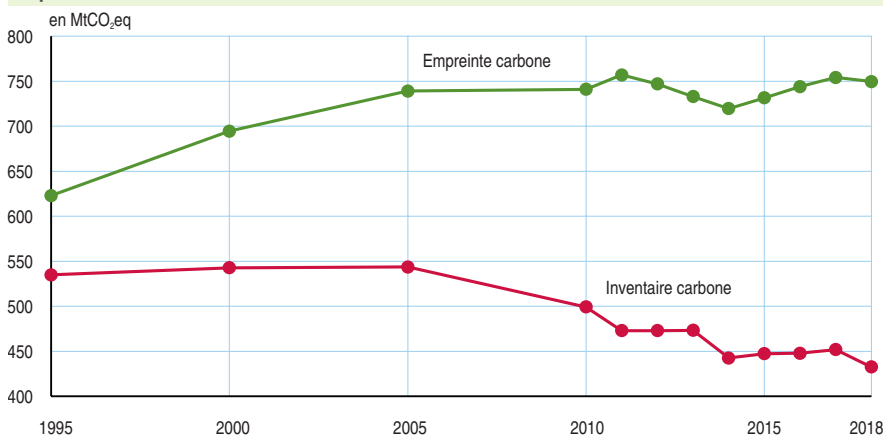
Le point de départ de la lutte mondiale contre le changement climatique est la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée à Rio en 1992 et ratifiée par 197 pays, dont l'objectif ultime est de prévenir les activités humaines « dangereuses » pour le système climatique, et qui reconnaît trois grands principes : précaution, responsabilité commune mais différenciée, droit au développement économique. Le traité crée la conférence des parties (COP), qui regroupe les membres de la convention-cadre et se réunit tous les ans pour favoriser l'application effective du traité. Signés en décembre 2015 dans le cadre de la COP21, les Accords de Paris constituent une avancée importante. L'approche se base notamment sur la coopération pour inciter tous les acteurs, publics et privés, à s'engager en faveur du climat : les parties déterminent librement leurs engagements, sous la forme de contributions déterminées au niveau national (INDCs en anglais), avec un mécanisme formel de révision tous les 5 ans. Les objectifs de la COP21 se déclinent suivant trois piliers : atténuation (maintenir l'augmentation de la température mondiale « nettement en dessous » de 2 °C d'ici à 2100) ; adaptation (capacités des pays à faire face aux impacts du changement climatique) ; finance (mobiliser 100 Md\$ annuels de financement climat d'ici 2020).

Au niveau de l'Union européenne (UE), le paquet énergie climat 2030 définit des objectifs, notamment une réduction d'au moins 40 % des gaz à effet de serre (GES) par rapport à 1990. Pour ce faire, l'UE dispose de deux instruments : le SEQUE (système d'échange de quotas d'émissions), ainsi qu'une décision de partage de l'effort pour les secteurs hors SEQUE (règlement de l'UE en 2018). En décembre 2019, la Commission européenne a présenté un pacte vert pour l'Europe, avec un nouvel objectif de neutralité climatique pour 2050 et des mesures dans de nombreux domaines, comme l'énergie, la construction, l'industrie, l'agriculture, la lutte contre la pollution ou la biodiversité.

Au niveau de la France, la lutte contre le changement climatique s'inscrit dans la loi. En 2015, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a franchi une étape en fixant l'objectif de diviser par 4 les émissions de GES entre 1990 et 2050 (scénario dit « facteur 4 »). La loi rénove aussi profondément les outils de gouvernance au niveau national, avec l'élaboration d'une programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et d'une Stratégie nationale bas carbone (SNBC). La loi « Énergie et Climat » adoptée en 2019 va encore plus loin, en fixant l'objectif de neutralité carbone en 2050, ce qui implique une division par 7 (scénario dit « facteur 7 ») des émissions de GES entre 1990 et 2050. Pour y parvenir, la loi porte 4 axes principaux : la sortie progressive des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables ; la lutte contre les passoires thermiques ; la gouvernance de la politique climatique et la régulation du secteur de l'électricité et du gaz. En cohérence avec le nouvel objectif de neutralité carbone, une nouvelle PPE et une nouvelle SNBC ont été adoptées en avril 2020.

Par ailleurs, si les objectifs nationaux concernent seulement les émissions de GES générées par la production réalisée sur le territoire national, encore appelé « inventaire national », les politiques économiques nationales ont également vocation à cibler le mode de vie et de consommation des citoyens, c'est-à-dire « l'empreinte carbone » qui s'obtient en retirant de l'inventaire carbone toutes les émissions des biens et services destinées à l'exportation et en ajoutant celles qui sont incorporées aux importations (figure). En effet, l'objectif ne peut pas se limiter à délocaliser les émissions de GES à l'étranger pour respecter les cibles nationales. À titre d'exemple en France, les émissions de GES ont baissé depuis 1995, mais l'empreinte carbone a continué à augmenter, ce qui signifie que le mode de vie des ménages n'a pas suffisamment changé et que les émissions produites sur le territoire ont été substituées progressivement par des émissions importées. Ainsi, en plus de la neutralité carbone, la SNBC vise aussi explicitement à réduire l'empreinte carbone de la France.

Empreinte et inventaire carbone de la France



Source : CGDD ; calculs des auteurs.

Commissariat général au développement durable (modèle TiTAN, anciennement D-CAM) vise à répertorier les gisements bas carbones pour chaque secteur et à estimer leurs potentiels et leurs vitesses de déploiement, grâce à une évaluation de leur coût d'abattement. Sur la base de ces évaluations technico-économiques, il est possible de formuler l'hypothèse d'une règle macro-économique d'évolution de l'intensité carbone de la production σ en fonction des dépenses pour le climat d . Dans la présente étude, on suppose un taux de décroissance de cette intensité carbone proportionnel à la dépense pour le climat exprimée en part de PIB, soit $\dot{\sigma}/\sigma = -\varepsilon d/\text{PIB}$, où ε est un paramètre représentant l'efficacité des dépenses climat dont la valeur est évaluée à 1,5, en l'état des connaissances [Germain, Lellouch, 2020]. À titre illustratif, une dépense pour le climat de 2 points de PIB conduirait donc à réduire l'intensité carbone de 3 %. Notre hypothèse sur l'efficacité des techniques de décarbonation reflète l'idée intuitive que plus l'intensité carbone est faible, plus la réduction supplémentaire de l'émission d'une tonne de GES est coûteuse, car les techniques de décarbonation les moins coûteuses sont mises en œuvre les premières.

Certaines études tablent également sur la découverte de technologies dites « de dernier ressort » (ou « *backstop* ») permettant d'absorber toutes les nouvelles émissions de CO₂ à partir de la date d'épuisement du budget carbone et supposées déployables à grande échelle sans externalité négative. De telles technologies, notamment la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS), sont actuellement expérimentées. Elles visent à générer des émissions négatives de CO₂ en interceptant le rejet de CO₂ dans l'atmosphère et en le redirigeant vers des sites de stockage géologiques. Néanmoins, le chemin à parcourir pour l'utilisation généralisée d'une telle technologie reste très important, ce qui rend cette hypothèse plutôt incertaine à un horizon de moyen terme. Par ailleurs, il n'y a pas de consensus sur le coût d'une telle technologie, ni sur sa faisabilité à grande échelle, les estimations dans la littérature allant de 50 euros à plusieurs centaines voire milliers d'euros la tonne de CO₂.

La cible d'émissions étant fixée et l'incidence des technologies de décarbonation spécifiée, le troisième élément requis pour des projections à horizon 2050 est la question du chemin vers l'objectif, et donc de l'équité intergénérationnelle de la trajectoire de dépenses pour le climat permettant la réduction des émissions. Quelles générations doivent payer pour le climat ? Préfère-t-on revenir le plus

rapidement possible sur la trajectoire cible ou souhaite-t-on lisser l'ajustement sur la première décennie par exemple, si on a une préférence pour le présent plus importante ? D'un point de vue de l'équité et de l'efficacité, et notamment, face aux incertitudes et risques de dommages graves et irréversibles, la logique de développement durable implique de ne pas retarder dans le temps les ajustements nécessaires, et d'opter autant que possible pour la première option. Ce choix permet en outre de conserver une flexibilité des actions à venir et de faire face aux cas où le progrès technique ne croît pas comme initialement prévu. Nos projections sont ainsi fondées sur une règle d'équité qui affecte à toutes les générations une dépense climat à égale proportion du PIB.

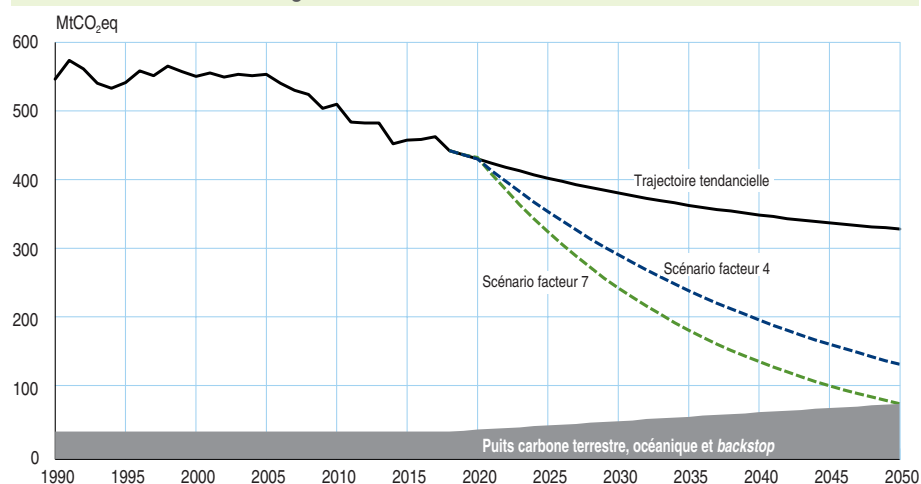
Pour la France, sous les hypothèses retenues, revenir sur une trajectoire optimale d'émission supposerait de doubler la dépense annuelle pour le climat

Si la commission Quinet fonde ses conclusions sur une appréciation des résultats de modèles sectoriels complexes, à la fois technico-économiques et macro-économiques, il est possible, dans une optique de moyen-long terme, de mettre en œuvre un modèle macroéconomique simplifié en se focalisant sur les trois facteurs critiques définis ci-dessus. On peut alors évaluer les trajectoires optimales de réduction d'émissions pour la France et le monde, ainsi qu'une mesure de l'effort annuel d'atténuation du changement climatique et une valeur du carbone conformément à l'objectif de réduction des émissions que l'on se fixe. En France, la loi Énergie et Climat de 2019 fixe un objectif de « zéro émissions nettes » en 2050, soit une réduction des émissions

brutes anthropiques de GES d'environ un **facteur 7** par rapport au niveau de 1990 (548 MtCO₂eq), sous l'hypothèse d'un doublement du puits carbone national à 80 MtCO₂eq. Aujourd'hui, les émissions de GES (inventaire carbone) sont déjà sur une trajectoire décroissante avec une intensité carbone de l'économie qui se réduit significativement chaque année (-2,6 % annuellement sur les dix dernières années), plus rapidement que la croissance en volume de l'activité. Cependant, la tendance actuelle n'est pas suffisante pour atteindre l'objectif : la trajectoire tendancielle conduirait à un niveau d'émission en 2050 à hauteur de 52 % du niveau de 1990, au lieu d'une cible à 14 % pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (figure 5). Le retour sur la trajectoire cible suppose un rythme significativement plus rapide de décarbonation de l'économie, combiné le cas échéant avec une modération du rythme de croissance de l'activité (figure 6) : il faudrait que les émissions décroissent de 5,5 % par an, contre un rythme moyen actuel d'environ 1 % (l'année 2020 faisant exception en raison de l'impact économique de la crise de la Covid-19).

Sauf à imaginer une chute drastique du revenu national dans les prochaines décennies, revenir sur la trajectoire cible suppose donc d'investir fortement dans les technologies de décarbonation. La programmation pluriannuelle de l'énergie et la stratégie nationale bas carbone précisent les objectifs ainsi que la nature de ces dépenses pour le climat. Ces dépenses s'élèvent en 2018 à 45,7 milliards d'euros (Md€), soit 1,9 point de PIB, d'après l'Institut I4CE (*Institute for Climate Economics*) qui réalise en liaison avec l'Ademe ce chiffrage, et sont portées pour moitié environ par les pouvoirs publics, via des investissements publics ou du soutien aux ménages et aux entreprises (prêts

5 Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre en France



Lecture : le scénario tendanciel correspond au prolongement des évolutions historiques récentes sur l'intensité carbone et le PIB, tandis que les scénarios facteur 4 et facteur 7 correspondent aux trajectoires optimales d'émissions résultant du modèle pour différentes cibles fixées à horizon 2050 (par exemple, pour le scénario facteur 4, division des émissions de GES par 4 en 2050 par rapport à 1990). Source : base de données CITEPA ; calculs des auteurs.

concessionnaires ou subventions). Elles concernent l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, les infrastructures durables, l'électricité nucléaire, les procédés industriels et le secteur bois/forêt (hors agroécologie) : il s'agit donc d'une vision assez large de la dépense climat, même si d'autres dépenses non spécifiquement ciblées sur le climat peuvent contribuer à diminuer l'intensité carbone de la production. La stratégie nationale de décarbonation prévoit ainsi une forte augmentation des dépenses climat dans l'ensemble de ces secteurs.

Notre modèle aboutit pour la France à une trajectoire optimale correspondant à des dépenses annuelles pour le climat de l'ordre de 4,5 % du PIB par an jusqu'en 2050 (encadré 2), soit environ 100 Mds euros de 2018 par an, pour atteindre la neutralité carbone (ou 3,5 % du PIB – 80 Md€ – pour respecter l'ancien objectif **facteur 4**). Il s'agirait donc, *a minima*, de doubler les efforts actuels. Au niveau mondial, l'effort de décarbonation s'élèverait à environ 5,1 % du PIB annuel, contre un niveau actuel, mal connu, mais *a priori* inférieur à 1 % du PIB. Les résultats sont bien sûr sensibles aux hypothèses retenues, notamment concernant les technologies de décarbonation et le critère de répartition de l'effort dans le temps, mais aussi concernant le taux de croissance de l'économie considéré comme exogène dans ce modèle. Ainsi, selon les

hypothèses de croissance retenues, la dépense climat annuelle – publique et privée – devrait être augmentée de 40 à 60 Mds d'euros de 2018 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 dans le scénario central d'efficacité énergétique (figure 7). Les évaluations produites par I4CE (32 à 41 Md€) et par la Commission européenne dans son rapport de 2018 *Clean Planet for All* (175 et 290 Md€ pour l'UE, soit 25 à 42 Md€ supplémentaires pour la France lorsqu'on rapporte au PIB) sont dans le même ordre de grandeur, mais à un niveau quelque peu inférieur. Elles apparaissent en effet, au regard du cadre de notre analyse, reposer sur une vision un peu optimiste du coût des technologies qui devront être déployées lorsque l'on s'approchera de la neutralité carbone.

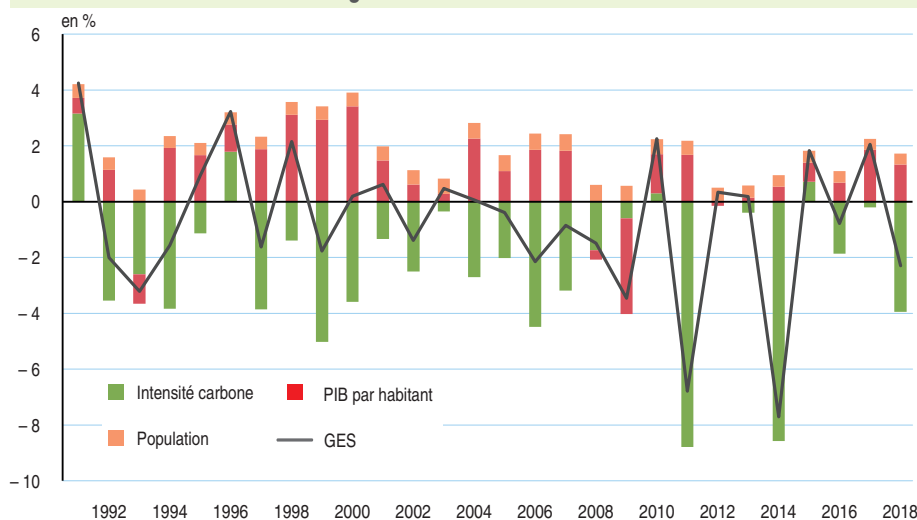
Le concept de prix social du carbone permet de donner une valeur unitaire à l'action pour le climat

Sur la base de tous ces éléments, il est possible de définir ce qu'on qualifie de prix social du carbone ou de « valeur de l'action climat », qui constituent à la fois un outil d'orientation des choix individuels et collectifs dans le domaine du climat et qui, du point de vue qui nous intéresse ici, ouvre la perspective d'indicateurs de soutenabilité commensurables avec les agrégats de la comptabilité nationale, en

donnant une valeur monétaire aux tonnes de GES émises.

Le terme de prix « social » du carbone dépend de l'objectif fixé par la société en matière climatique et peut recouvrir différentes notions qu'il convient d'appréhender avec vigilance dans les comparaisons, comme dans l'usage qui peut être fait des valeurs estimées par les modèles. Il y a essentiellement deux approches : une approche qu'on qualifiera de « comptable » consistant à rapporter la dépense optimale au flux d'émissions courantes de GES, et une approche « coût » fondée sur la valeur monétaire que la collectivité donne aux actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne de CO₂. La première est simple à interpréter dans le cas d'une politique climatique qui prendrait la forme exclusive d'une contribution carbone, intégralement affectée au financement de dépenses publiques de décarbonation. Néanmoins, dans la pratique, le prix social du carbone couvre un ensemble de politiques pour le climat très variées, allant

6 Contributions aux évolutions de gaz à effet de serre en France



Lecture : en 2018, les émissions françaises de GES ont diminué de 2,3 %, ce qui s'explique pour 0,4 % par la croissance de la population, pour 1,3 % par la hausse du PIB par habitant et pour - 3,9 % par la baisse de l'intensité carbone.
Source : base de données CITEPA ; calcul des auteurs.

7 Sensibilité des dépenses climat aux hypothèses de croissance et d'efficacité énergétique

Scénarios d'efficacité énergétique	Scénarios de croissance annuelle		
	1,5 %	1 %	0 %
Prudent	6,9 % (157 Md€)	6,4 % (147 Md€)	5,6 % (129 Md€)
Central	4,5 % (104 Md€)	4,3 % (97 Md€)	3,7 % (85 Md€)
Optimiste	3,4 % (77 Md€)	3,2 % (72 Md€)	2,8 % (63 Md€)

Lecture : pour un scénario prudent d'efficacité énergétique ($\epsilon = 1$) et un scénario de croissance nulle, la dépense climat optimale compatible avec l'objectif de neutralité carbone en 2050 est de 5,6 % du PIB chaque année, soit 129 milliards d'euros de 2018.
Source : base de données CITEPA ; calculs des auteurs.

Encadré 2 Mesure de la dépense climat optimale

Pour mesurer la dépense climat optimale, nous nous appuyons sur un modèle simplifié d'économie du climat, correspondant à une extension du modèle de Solow, qui intègre la dynamique des émissions de gaz à effet de serre en fonction de dépenses de décarbonation. Pour simplifier, nous décrivons les résultats dans le cas où le taux d'épargne est constant, mais ce modèle peut être généralisé en endogénéisant le taux d'épargne, comme le résultat de l'optimisation d'une fonction d'utilité intertemporelle (cf. modèle de Ramsey-Cass-Koopmans). Plus précisément, les résultats s'appuient sur les hypothèses fondamentales suivantes :

- la cible optimale d'émission de GES est fixée de manière exogène ; pour la France, elle correspond à l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050 sous l'hypothèse d'un doublement du puits actuel (i.e. des émissions brutes anthropiques à hauteur de 80 MtCO₂eq en 2050) ;
- le critère d'équité intergénérationnelle suppose une dépense pour le climat en points de PIB constante chaque année le long de la trajectoire.

À l'état stationnaire, lorsque le taux d'épargne est constant, la dépense annuelle optimale pour le climat le long de la trajectoire se déduit suivant une règle simple : $[g + \Gamma] / \epsilon$ % du PIB, où g est le taux de croissance du PIB, Γ le taux-cible de réduction des émissions et ϵ un facteur d'efficacité des technologies de décarbonation fixé à 1,5 dans l'état des connaissances. Avec les hypothèses du modèle, on obtient une dépense optimale pour le climat à hauteur de 4,5 % du PIB, soit environ 100 Md€ de 2018.

de la taxe carbone aux quotas d'émissions en passant entre autres par l'imposition de normes thermiques pour les bâtiments et le financement d'infrastructures de transports en commun. Cette première approche revient donc à mesurer à quel prix il faut facturer, explicitement ou implicitement, le carbone pour atteindre la cible de neutralité dans un effort équitablement réparti. La seconde option consiste à diviser la dépense climat par le flux cumulé des émissions actuelles et futures évitées, correspondant d'un point de vue théorique au coût marginal d'abattement, à savoir la division d'un coût d'investissement climat par les émissions évitées sur la durée de vie dudit investissement ; c'est l'optique du rapport de la commission Quinet qui vise à intégrer la dimension climatique dans la mesure du coût socio-économique des investissements afin de provoquer des changements de comportement des agents économiques vers des modes non carbonés. Les deux notions sont bien évidemment liées, et peuvent être mise en cohérence, même si l'usage n'est pas le même.

Quelle que soit la définition retenue, le prix social du carbone suit une évolution exponentielle en fonction du temps : tout retard dans la décarbonation aujourd'hui sera payé plus cher par les générations futures. Nos simulations tendent à valider la très forte revalorisation qu'a constituée le rapport Quinet par rapport aux estimations antérieures. Ainsi, dans l'approche « comptable », le prix social du carbone s'établirait à environ 500 euros en 2030, 1 010 euros en 2040 et 2 050 euros en 2050 pour l'objectif de neutralité carbone (figure 8), correspondant à un quasi-doublement de la valeur sociale du carbone par rapport à l'objectif facteur 4 qui prévalait jusqu'en 2018. Dans l'approche

« coût », c'est-à-dire sur une logique similaire à celle de la commission Quinet, et avec un facteur d'actualisation de 5 % sur la mesure des émissions futures évitées, le prix social du carbone s'élèverait à environ 260 euros en 2030, 520 euros en 2040 et 1 060 euros en 2050. Ces ordres de grandeur sont très proches de ceux proposés par le rapport Quinet, à savoir 250 euros en 2030, 500 euros en 2040 et 775 euros en 2050, pour ce même objectif de neutralité carbone. À titre de comparaison, sur le marché européen des droits à polluer, la tonne de CO₂ s'échangeait autour de seulement 25 euros début 2020.

Vers des indicateurs comptables de soutenabilité ?

Avec des volumes bien définis et des prix mieux établis, il est possible de construire des grandeurs intégrant la question de soutenabilité climatique, de nature à compléter les indicateurs traditionnels de comptabilité nationale.

Tout d'abord, nous pouvons définir une notion d'engagement pour le climat, en considérant de manière prospective le cumul des coûts à payer dans le futur pour revenir à la trajectoire cible, que ces coûts soient à supporter de manière publique ou privée, sous forme d'investissement ou de renoncement à consommer. Autrement dit, il s'agit du montant de ressources financières qu'il faudrait avoir en réserve pour respecter la cible d'émissions 2050 sans avoir à ponctionner la consommation future. C'est une notion importante car elle traduit l'idée que chaque euro non dépensé en investissement climat aujourd'hui se reportera sur les générations futures. Avec un taux d'actualisation égal au

taux de croissance de l'économie, cet engagement s'élève à environ 150 % du PIB de 2018, et peut se mesurer au premier ordre simplement par le nombre d'années pour atteindre la neutralité (ici de 2020 à 2050) multipliée par la dépense climat annuelle moyenne en point de PIB. Une partie de cet engagement sera spontanément honorée si on maintient la dépense climat à son niveau actuel. Le reste, environ 85 % du PIB, doit être financé par un surcroît de dépense pour le climat ou par des évolutions des modes de consommation.

Un autre concept est de type rétrospectif et consiste à évaluer les coûts non payés dans le passé ayant conduit à la concentration actuelle de GES dans l'atmosphère, en valorisant le flux des émissions passées au prix social courant du carbone. En effet, peu importe le moment où le CO₂ a été émis, il contribue de la même manière au changement climatique. Un choix conventionnel doit être fait sur la date à partir de laquelle sont cumulées ces émissions passées et on peut par exemple retenir l'année 1990 qui correspond au point de départ des engagements du protocole de Kyoto. Cet indicateur peut être évalué en niveau courant et projeté dans le futur, puis comparé à un plafond à ne pas dépasser correspondant à l'épuisement d'un budget carbone préalablement défini. Il peut aussi être rapproché de l'idée de passif que les pays développés, pollueurs « historiques », auraient accumulé vis-à-vis des pays de développement plus récent, une question fondamentale pour la question de la répartition des efforts de décarbonation au niveau mondial.

Au-delà de ces indicateurs centrés sur le climat, disposer d'un prix du carbone convenablement évalué offre des pistes pour répondre à la problématique de la soutenabilité globale du modèle de développement, une question abordée dans le rapport Stiglitz-Sen-Fitoussi en 2009 [Stiglitz *et al.*, 2009]. L'approche qu'avait envisagée ce rapport était celle dite de la « richesse inclusive », c'est-à-dire une mesure du capital global incluant les dimensions physiques, humaines et naturelles, à laquelle est associé le concept d'épargne nette ajustée, correspondant localement à prix constants à la variation de la richesse inclusive. L'idée sous-jacente, légitimement contestée, est que la baisse d'un type actif peut être compensée par la hausse d'un autre : on parle alors de soutenabilité faible. Cela pose la question d'une part de la mesure de chaque actif et d'autre part de la possibilité de les agréger *via* un système de prix relatifs les rendant commensurables. En réalité, ce n'est pas le cas du climat notamment si les dommages sont irréversibles, car alors une dégradation marquée de l'environnement ne pourra pas être compensée par une accumulation de

8 Évaluations du prix de la tonne de CO₂ pour l'objectif de neutralité carbone en 2050

	2020	2030	2040	2050
Valeurs nationales France (€/tCO₂eq)				
Résultats du modèle				
Approche « comptable »	247	501	1 014	2 052
pour mémoire avec l'objectif facteur 4	188	320	547	937
Approche « coûts » (taux d'actualisation de 5 %)	127	258	522	1 057
Estimations commission Quinet 2019 (approche « coûts »)	88	250	500	775
Estimations modèles utilisés par la commission Quinet				
Modèle ThreeME		143	1 128	2 389
Modèle NEMESIS		185	784	1 934*
Modèle POLES		351	845	3 513
Modèle TIMES		288	465	2 451
Valeurs mondiales (\$/tCO₂eq)				
Résultats du modèle				
Approche « comptable »	85	189	422	942
Estimations GIEC				
Objectif + 1,5 °C		334	585	1 026
Objectif + 2 °C		164		518

* Valeur pour 2045.

Source : commission Quinet (2019) ; calculs des auteurs.

capital physique ou de capital humain. C'est ce constat qui invite à retenir plusieurs indicateurs de soutenabilité, isolant notamment ceux dont l'impact est vital pour l'homme (pollution, réchauffement climatique) comme le proposait le rapport Stiglitz-Sen-Fitoussi.

Malgré leur caractère largement imparfait, ces notions de richesse inclusive et d'épargne nette ajustée sont utilisées par certaines institutions, notamment la Banque Mondiale qui s'appuie sur un prix de la tonne de CO₂ fixé à seulement 30 US\$. Il peut donc être intéressant de réestimer ces indicateurs lorsque les émissions de CO₂ sont valorisées avec le nouveau prix du carbone rehaussé. En pratique, l'épargne nette ajustée mesure l'épargne nette nationale traditionnelle à laquelle on ajoute au sens algébrique la variation de capital humain (dépenses d'éducation par exemple) et de capital naturel. Pour ce dernier, il s'agit souvent de perte de capital naturel, à travers la déplétion des ressources naturelles (déforestation, énergies fossiles, métaux et minéraux) et les dommages dus à l'exposition à la pollution de l'air et aux émissions de GES dans l'atmosphère. Cet indicateur d'épargne nette ajustée inclut en réalité une composante climatique correspondant au solde entre la dépense pour le climat effective, déjà comprise dans l'épargne nette nationale à travers la formation brute de capital fixe, et les émissions de GES valorisées selon l'approche « comptable ». Cette composante climatique s'annule lorsque la dépense climat est à son niveau optimal.

Sans surprise, le choix du prix du CO₂ est déterminant dans l'interprétation des résultats : prendre un prix du CO₂ conforme aux estimations présentées ici, qui rejoignent celles du rapport Quinet et du GIEC, conduit à rendre négative l'épargne nette ajustée, pour la France et le monde, délivrant un message de non-soutenabilité des trajectoires de production et de consommation actuelles. Enfin, il convient de rappeler que la question purement climatique n'épuise pas le sujet de la soutenabilité environnementale au sens large, puisque cette dernière inclut notamment les problématiques relatives à la biodiversité et à l'épuisement des ressources naturelles qui atteignent des niveaux jugés critiques. ■

Définitions

Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) : catégorie qui regroupe les émissions et absorption de gaz à effet de serre (GES) découlant directement des activités humaines liées à l'utilisation des terres, leurs changements d'affectation (par exemple déforestation ou urbanisation de terres agricoles) et à la forêt. Au niveau mondial, le secteur est émetteur net de GES pour environ 5 GtCO₂eq par an sur 2000-2010 (données GIEC). En France, le secteur est un puits net de carbone, à - 31,9 MtCO₂eq en 2017 (données Commissariat général au développement durable).

tCO₂eq : la tonne équivalent CO₂ est une unité créée par le GIEC pour rendre commensurable les différents gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, gaz fluorés), qui ont chacun une durée de vie dans l'atmosphère et un « potentiel de réchauffement global » différents. Le CO₂ est utilisé ici comme gaz étalon. À titre d'exemple, une tonne de méthane (CH₄) vaut 28 tCO₂eq. Par ailleurs, il ne faut pas confondre tonne de CO₂ et tonne de carbone, la conversion de l'une à l'autre se faisant en multipliant par 3/11.

Puits carbone : réservoir qui stocke, par un mécanisme naturel ou artificiel, le carbone atmosphérique. Ce sont essentiellement les océans, les forêts ainsi que les projets de capture et de séquestration du CO₂.

Budget carbone : quota d'émissions ou des émissions acceptables représentant la limite supérieure des émissions de dioxyde de carbone total (CO₂) qui permettrait de rester en dessous d'une température moyenne mondiale donnée.

Intensité carbone : quantité de gaz à effet de serre émis par unité de production. Cet indicateur nous renseigne sur la dépendance aux émissions de GES du processus de production d'une économie.

Neutralité carbone : situation où les émissions brutes de GES d'origine anthropiques sont inférieures ou égales à la quantité de CO₂ pouvant être absorbée par les puits carbone (i.e. zéro émissions nettes).

Facteur 4 / Facteur 7 : scénarios de réduction des émissions de GES conformément à une cible fixée pour la France en 2050. Le scénario facteur 4 (respectivement facteur 7) correspond à une division par 4 (respectivement 7) des émissions de GES en 2050 par rapport au niveau de

1990, conformément à l'objectif défini par la loi de transition énergétique de 2015 (respectivement au nouvel objectif de neutralité carbone défini par la loi Énergie et Climat de 2019).

Pour en savoir plus

- Germain J.-M., Lellouch T., « Coût social du réchauffement climatique et indicateurs de soutenabilité : les enseignements d'une application à la France », *Économie et Statistiques* n° 517-518-519, Insee, 2020.
- OFCE, « The imperative of Sustainability, independent Annual Sustainable Economy Survey », 7th Report, 2019.
- GIEC, « Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C. Résumé à l'intention des décideurs », 2019.
- Quinet A., « La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques », *Rapport France Stratégie*, 2019.
- « Panorama des Financements Climats », Institute for Climate Economics, édition 2018.
- Baptiste-Perrissin F., Foussard A., « Trajectoires de transition bas carbone au moindre coût », ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer, *Théma du SEEIDD*, novembre 2016.
- Carney M., « Breaking the tragedy of the horizon – climate change and financial stability », Speech by Mr Mark Carney, Governor of the Bank of England and Chairman of the Financial Stability Board, at Lloyd's of London, 2015.
- Arrow K.-J., Dasgupta P., Goulder L.-H., Mumford K.-J., Oleson K., « Sustainability and the Measurement of Wealth », in *Environment and Development Economics*, volume 17, 317-353, Cambridge University Press, 2012.
- Stiglitz J., Sen A., Fitoussi J.-P., *Rapport de la commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, 2009.
- Nordhaus W.-D., « The « DICE » model : Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate Economy Model of the Economics of Global Warming », *Cowles Foundation Discussion Papers* n° 1009, 1992.
- Hardin G., « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, no 3859, décembre 1968.

Direction Générale :
88 avenue Verdier
92541 Montrouge Cedex
Directeur de la publication :
Jean-Luc Tavernier
Rédactrices en chef :
A. Goin, S. Pujol
Rédacteurs :
A. Dugué,
P. Glénat, C. Tchobanian
Maquette : P. Thibaudeau
Code Sage : IA2056
ISSN 2416-7851
© Insee 2020

- *Insee Analyses* figure dès sa parution sur le site internet de l'Insee :
<https://www.insee.fr/fr/statistiques?debut=0&collection=6>
- Pour recevoir par courriel les avis de parution :
<https://www.insee.fr/fr/information/1405555>

