

# Coût social du réchauffement climatique et indicateurs de soutenabilité : les enseignements d'une application à la France

## *The Social Cost of Global Warming and Sustainability Indicators: Lessons from an Application to France*

Jean-Marc Germain et Thomas Lellouch\*

**Résumé** – Respecter les engagements climatiques qui découlent des accords de Paris sur le climat nécessite d'engager des moyens financiers importants que l'on évalue ici à l'aide d'un modèle macroéconomique combinant un critère de répartition intergénérationnelle de l'effort climatique et des hypothèses sur l'efficacité des technologies de décarbonation. Les résultats montrent que pour la France, la trajectoire actuelle d'émissions de gaz à effet de serre n'est pas soutenable, au sens où pour atteindre l'engagement de neutralité carbone en 2050, le niveau annuel de dépenses pour le climat devrait augmenter de manière très substantielle, à 4.5 % du PIB contre 1.9 % actuellement. Ces évaluations permettent d'en déduire un prix social du carbone, ou valeur de l'action climat, supérieures aux estimations antérieures comme celles de la commission Stiglitz-Stern, et dans la lignée des résultats de la commission Quinet en 2019. De telles évaluations de trajectoire d'émissions et de prix social du carbone pourraient constituer le point d'entrée d'une comptabilité économique environnementale qui intègre la dégradation du patrimoine naturel induite par les activités économiques.

**Abstract** – In order to meet the Paris agreements, significant financial resources must be incurred, which are evaluated here using a macroeconomic model combining a criterion of inter-generational distribution of the climate effort and assumptions on decarbonisation technologies. The results show that for France, the current greenhouse gas emissions trajectory is unsustainable, in the sense that in order to reach the carbon neutrality commitment in 2050, the annual level of climate spending would have to increase very substantially, to 4.5% of GDP from the current 1.9%. These evaluations make it possible to deduce a social price of carbon or a value for climate action, which has been increased significantly compared to previous evaluations such as those of the Stiglitz-Stern commission, in line with the results of the Quinet committee in 2019. Such evaluations of the emissions trajectory and the social price of carbon could be the entry point for an environmental economic accounting that includes the degradation of natural assets caused by economic activities.

Codes JEL / JEL Classification : Q01, Q54, Q56, E01, E21, O13

Mots-clés : soutenabilité, changement climatique, prix du carbone, épargne nette ajustée

Keywords: sustainability, climate change, carbon price, adjusted net savings

\*Insee (jean-marc.germain@insee.fr ; thomas.lellouch@insee.fr)

Ce travail a bénéficié de discussions utiles et de commentaires enrichissants de la part de Didier Blanchet, de deux rapporteurs anonymes, ainsi que des participants au séminaire du DEE (Insee) du 5 mai 2020 et plus particulièrement Xavier Timbeau, qui a discuté la présentation.

Reçu le 4 octobre 2019, accepté après révisions le 4 juin 2020.

Citation: Germain, J.-M. & Lellouch, T. (2020). The Social Cost of Global Warming and Sustainability Indicators: Lessons from an Application to France. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 517-518-519, 81–102. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2020.517t.2024>

**A** lors que la température mondiale a connu une augmentation très nette depuis les années 1980, le consensus scientifique est dorénavant établi pour reconnaître l'impact des activités humaines sur le réchauffement climatique, à travers les émissions de gaz à effet de serre (GES). En retour, le réchauffement climatique va engendrer des dommages sur les sociétés humaines et les milieux naturels, et les risques de dommages abrupts et irréversibles sont croissants avec le degré du réchauffement.

Dans ce contexte, le cadre international de lutte contre le changement climatique a été considérablement renforcé ces dernières années, avec notamment les accords de Paris en 2015 (COP21) qui définissent un objectif partagé de limitation de la hausse de la température moyenne de la planète « nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels ». Cet objectif s'appuie notamment sur les travaux du GIEC, qui montrent que les risques de dommages deviennent très élevés dans les scénarios impliquant une augmentation de la température au-delà de 2°C (GIEC, 2015). Les différentes nations commencent également à prendre chacune des engagements en fixant des cibles de réduction d'émissions de GES à un certain horizon. S'agissant de la France, l'objectif de neutralité carbone en 2050 a été fixé par la loi en 2019 et les objectifs climatiques se traduisent par des stratégies nationales bas carbone (SNBC), qui sont constituées d'une trajectoire de réduction des émissions de GES et de mesures à mettre en œuvre pour atteindre cet objectif. Elles donnent lieu à des décrets d'application qui fixent par période triennale des budgets carbone (quantités annuelles d'émissions à ne pas dépasser). L'ampleur des efforts à accomplir pour parvenir à ces cibles, leur répartition dans le temps et les conséquences sur le niveau de vie et sa soutenabilité restent des points débattus.

Ainsi, la question de la soutenabilité climatique de la croissance se pose et la comptabilité économique environnementale a précisément pour objectif de fournir les données qui permettent d'analyser cette question essentielle. Contrairement aux domaines traditionnels de la comptabilité nationale, où l'on mesure les valeurs, les prix et les volumes, la matière environnementale se caractérise par l'absence de prix ou par le fait que ces derniers ne reflètent pas la valeur des actifs (les ressources naturelles, la biodiversité, le climat...) ni celle des passifs (la pollution, le réchauffement climatique). La comptabilité économique environnementale

consiste à remplacer les prix de marché par une valeur sociale. À cet égard, l'accord de Paris constitue un tournant au sens où l'objectif des sociétés humaines, en matière climatique, peut désormais être considéré comme fixé : limiter le réchauffement climatique à 2°C et pour cela atteindre la neutralité carbone à horizon 2050. Dans le langage de la comptabilité économique environnementale, cet accord constitue la référence permettant de donner une valeur au carbone.

Traduire économiquement notre objectif climatique partagé suppose d'être capables de prévoir les différentes trajectoires économiques et climatiques possibles en fonction des efforts entrepris par chacun. À l'aide d'un modèle macroéconomique construit sur la base d'hypothèses réalistes sur les technologies de décarbonation et la répartition des efforts entre générations, nous évaluons 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. Ce modèle permet également de déterminer une valeur du carbone en France, revisitant ainsi les résultats du rapport de la commission Quinet (Quinet, 2019). En réévaluant significativement à la hausse le prix du carbone au regard des évaluations précédentes, le rapport Quinet a constitué un moment important sur le débat relatif à la valorisation sociale de l'action pour le climat. Nos résultats vont encore plus loin dans ce sens et conduisent à considérer les prix Quinet comme un minimum au regard de l'objectif de neutralité carbone en 2050.

La modélisation de trajectoires de réduction des émissions de GES nous permet d'évaluer la soutenabilité climatique. Plus complexe est la mesure de la soutenabilité au sens général. La Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social avait d'ailleurs renoncé à cette ambition et son rapport recommandait de séparer les deux dimensions de la soutenabilité économique et de la soutenabilité environnementale (Stiglitz *et al.*, 2009), écartant donc les approches de type richesse inclusive ou épargne nette ajustée qui tentent d'évaluer la soutenabilité globale en faisant masse de l'ensemble des « capitaux » économiques et naturels qui sont transmis d'une génération à la suivante. Les progrès sur le prix du carbone et l'estimation des technologies de décarbonation nous invitent néanmoins à revisiter le sujet, en réévaluant la soutenabilité globale en France et dans le monde, lorsque la dégradation du capital

naturel est valorisée aux nouvelles estimations du prix du carbone.

Après une description du modèle simplifié d'économie du climat (section 1), nous nous attacherons à évaluer la soutenabilité climatique en comparant la trajectoire effective de réduction des émissions de GES, à celle que nécessiterait le respect des objectifs fixés par les accords de Paris et en mesurant l'ampleur de l'effort à accomplir (section 2). Nous nous pencherons ensuite sur les estimations de valeur sociale de l'action pour le climat qui en découlent (section 3), puis nous aborderons la question de la soutenabilité au sens large, à travers une évaluation, au plan national comme mondial, de l'épargne nette ajustée et de la richesse inclusive (section 4) avant de conclure.

### 1. Évaluer l'effort de lutte contre le réchauffement climatique et le répartir entre les générations : cadre d'analyse

Évaluer la soutenabilité de la trajectoire de développement économique consiste fondamentalement à se projeter dans l'avenir à moyen et long terme et exige, en conséquence, un recours à la modélisation. Il existe de nombreux modèles, nationaux comme internationaux qui intègrent, de manière périphérique ou plus centrale, les préoccupations environnementales. Ils peuvent comprendre plusieurs centaines d'équations et ont tous leur utilité pour simuler, à court ou moyen terme, l'impact de mesures ciblées ou sectorielles. Leur sophistication a aussi un coût, qui est de rendre plus difficilement identifiables

les hypothèses qui déterminent fondamentalement leurs résultats. Comme l'indiquait Robert Solow en introduction de sa « Contribution à la théorie de la croissance économique » (Solow, 1956), la force d'un modèle économique réside parfois moins dans sa complexité que dans sa capacité à formuler des hypothèses centrales offrant le bon compromis entre simplicité et réalisme. C'est sur ces hypothèses centrales, qui constituent le cœur du réacteur des modèles intégrés économie-climat, que nous nous concentrons ici (figure I).

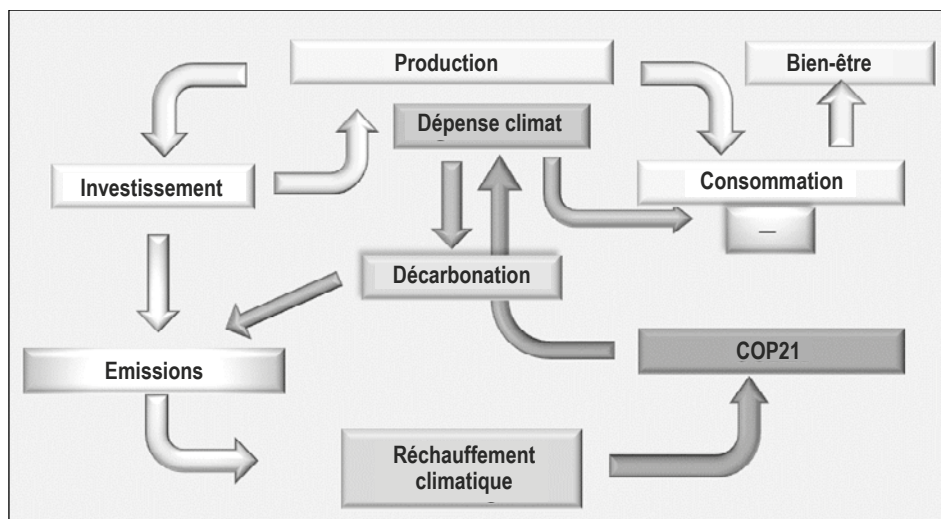
#### 1.1. Production et émissions de gaz à effet de serre

Dans cet esprit de focalisation sur les facteurs critiques, nous considérons ici un modèle stylisé d'une économie avec capital  $K_t$  et travail  $L_t$  comme facteurs de production et une fonction de production de type Cobb-Douglas :  $Y_t = K_t^\alpha (A_t L_t)^{1-\alpha}$ . Le travail et le progrès technique  $A_t$  sont exogènes et croissent suivant une loi exponentielle<sup>1</sup>. À chaque période, les ménages épargnent une proportion  $s_t$  du revenu national, venant alimenter le stock de capital, qui se déprécie chaque année au taux  $\delta$ . La loi d'évolution du capital physique est donc la suivante :  $K_{t+1} = K_t + s_t Y_t - \delta K_t$

L'imbrication climat-économie se traduit essentiellement par deux éléments :

1. Pour le modèle mondial, le taux de croissance annuel de la population diminue progressivement au cours du temps, pour arriver à une population mondiale d'environ 10 milliards d'habitants en 2050.

Figure I – Les principaux déterminants du modèle



(i) les activités économiques sont à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre  $E_t = \sigma_t Y_t$ , où  $\sigma_t$  représente l'intensité carbone de l'économie ;

(ii) des dépenses climat  $D_t$ , en faveur des technologies de décarbonation, peuvent réduire l'intensité carbone, et donc limiter la croissance des émissions. Ces dépenses viennent réduire d'autant la consommation  $C_t = Y_t - s_t Y_t - D_t$ .

À chaque période, les pouvoirs publics ont la possibilité d'agir sur les deux leviers que sont  $\Lambda_t = D_t/Y_t$ , la part des dépenses climat dans le PIB et  $s_t$ , le taux d'épargne. Ils le font en cherchant la trajectoire économique, compatible avec l'objectif climatique, qui maximise une fonction d'utilité intertemporelle préalablement définie.

## 1.2. Fonction de dommages et cible climatique

Une des questions centrales consiste à évaluer la cible optimale d'émissions de GES. Les travaux pionniers de Nordhaus (1977), qui construit un modèle dynamique intégré de changement climatique et de l'économie (DICE, pour *Dynamic Integrated model of Climate and Economy*), donnent des premiers éléments de réponse. En exprimant précisément la fonction de dommages en fonction de la température mondiale, ce type de modèle permet de calculer une trajectoire optimale, économique comme climatique. La cible d'émissions de gaz à effet de serre apparaît comme endogène à l'ensemble du modèle : il s'agit de l'approche coût-bénéfices (figure II-A).

Si cette approche est naturelle d'un point de vue théorique, elle est particulièrement difficile à mettre en œuvre en pratique en raison de la très grande difficulté de valorisation monétaire des dommages climatiques. Il existe des coûts marchands (comme l'érosion de la productivité, la destruction de capital productif), mais également des coûts non marchands (comme la perte de biodiversité, la destruction d'écosystèmes) beaucoup plus difficiles à valoriser correctement. Plus encore, au-delà des dommages marginaux, se pose la question des risques de dommages graves et irréversibles, voire d'effondrement, qui ne sont généralement pas pris en compte du tout. Il en résulte une sous-estimation des dommages et, partant, des recommandations de politique économique qui s'accommodent du réchauffement climatique au-delà du raisonnable. Il en est ainsi de la fonction de dommages du modèle DICE, certes quadratique en fonction

de la température, mais avec un coefficient tellement faible que l'optimum climatique est 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.

Sur ce plan, il y a un avant et un après 2015. Les travaux du GIEC ont permis de former un consensus scientifique sur les conséquences du réchauffement climatique et la nécessité de contenir de réchauffement depuis l'ère préindustrielle à 2°C, ce qui implique un plafond d'émissions à un certain horizon temporel. D'autres modèles considèrent donc comme donnés les objectifs de limitation de la hausse de température fixés par la communauté internationale (GIEC, accords de Paris, etc.) et donc de réduction des émissions de GES. C'est notamment le cas, par nécessité, des modèles nationaux, les équilibres climatiques n'ayant de sens qu'au niveau mondial. Cette seconde catégorie de modèles est utilisée pour évaluer les trajectoires nationales et/ou mondiales. Le principe consiste à se fixer un objectif tutélaire exogène de réduction des émissions, puis de chiffrer la trajectoire de dépenses nécessaire pour atteindre cette cible. La fonction de dommage est donc définie implicitement par la cible climatique : avant d'atteindre la cible les dommages sont nuls ou faiblement croissants ; ils deviennent infinis si la cible est dépassée. Nous parlerons alors d'approche coût-efficacité (figure II-B).

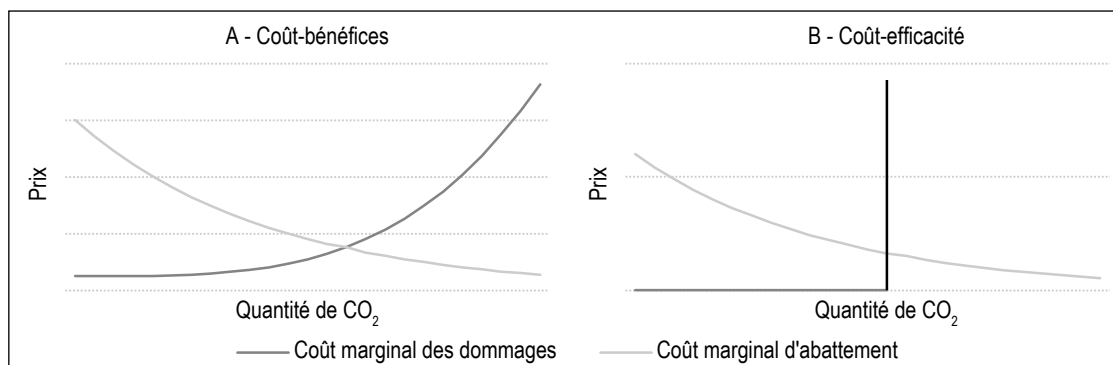
Pour la France, la cible climatique est aujourd'hui définie par la loi énergie-climat de 2019. Il s'agit d'un objectif de zéro émissions nettes (ZEN), i.e. la neutralité carbone, d'ici 2050, à obtenir en combinant une division des émissions par un facteur d'environ  $F=7$  par rapport au niveau de 1990 et un doublement des capacités du puits carbone<sup>2</sup>, le faisant passer de 40 à 80 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par an. Cet objectif succède à un premier objectif de division des émissions par un facteur  $F=4$  à l'horizon 2050 en comparaison des émissions de 1990, défini par la loi de transition énergétique de 2015.

## 1.3. Technologies d'atténuation et décarbonation de l'économie

La difficile question de la valorisation des dommages étant écartée par la définition *ex ante*

2. Réservoir qui stocke, par un mécanisme naturel ou artificiel, le carbone atmosphérique. Les puits carbone sont essentiellement les océans, les forêts ainsi que les projets de capture et de séquestration du CO<sub>2</sub>.

Figure II – Approches coût-bénéfices et coût-efficacité



Lecture : le graphique A montre la forme des courbes de coût marginal des dommages (croissant avec la quantité de CO<sub>2</sub> émis) et d'abattement (décroissant avec la quantité de CO<sub>2</sub> émis). Le graphique B montre une nouvelle forme pour la courbe de coût des dommages, qui devient infinie à partir d'un certain seuil d'émission, correspondant à l'épuisement du budget carbone.

d'un objectif de réduction d'émission, c'est bien l'évolution des technologies de décarbonation qui devient une hypothèse centrale du modèle. Quel est le coût des technologies de réduction des émissions de GES, dit « coût d'abattement », qu'il va falloir mettre en œuvre ? Autrement dit, quelle est la loi d'évolution, d'ici à 2050, de l'intensité carbone de l'économie en fonction des dépenses climat ?

Il existe un large consensus autour de l'idée que plus l'intensité carbone est faible, plus la réduction des émissions est coûteuse, tout simplement parce que les techniques de décarbonation les moins coûteuses sont mises en œuvre les premières. Ceci nous invite à prendre une loi générale d'évolution de l'intensité carbone en fonction des dépenses pour le climat de la forme suivante:  $\sigma_{t+1} = \sigma_t (1 - \varepsilon(\sigma_t) A_t)$ , où  $\varepsilon(\sigma_t)$  est une fonction croissante de  $\sigma_t$ . À PIB donné, plus les émissions sont faibles, plus il est coûteux « d'abattre » une quantité donnée de CO<sub>2</sub>. Nous retenons ici une forme fonctionnelle simple :  $\varepsilon(\sigma_t) = \varepsilon \sigma_t^{\theta-1}$  où  $\varepsilon$  et  $\theta$  sont des paramètres à définir.

Deux approches sont théoriquement possibles pour évaluer ces paramètres. La première est macroéconomique et économétrique. Elle consisterait à procéder à des régressions intertemporelles et inter-pays. Malheureusement, à ce jour, l'absence de données suffisantes sur la dépense climat ne le permet pas. Cela souligne à quel point il serait utile que des progrès soient réalisés très vite dans l'établissement d'une comptabilité économique environnementale. Le cadre existe, il s'agit du *System of Environmental Economic Accounting* (SEEA), ensemble de normes définies par la commission statistique de l'ONU et calqué dans

son architecture sur le SNA (*System of National Accounts*) qui régit les comptabilités publiques des nations.

L'autre approche est microéconomique et paramétrique à partir des courbes de coût d'abattement moyen des technologies de décarbonation de l'économie. Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à calculer le rapport coût/efficacité des différentes technologies (l'isolation des logements, l'éolien, la voiture à hydrogène, etc...), soit le rapport entre l'ensemble des coûts de mise en œuvre et le total des émissions évitées. Cette méthode est utilisée en France par le ministère de l'Environnement, à l'aide du modèle TITAN (anciennement D-CAM) qui classe les technologies par ordre croissant de coût et en déduit une courbe mettant en regard coût unitaire et potentiel total d'abattement.

La figure III compare les coûts moyens d'abattement issus des études technico-économiques et ceux obtenus avec notre hypothèse d'évolution de l'intensité carbone pour les deux cas  $\theta = 1$  ou 1.5, avec une valeur de  $\varepsilon \sigma_0^{\theta-1} = 1.5^3$ . Ce rapprochement tend à valider tant la nature de l'équation d'atténuation, que la valeur du paramètre  $\varepsilon$ . Par exemple, les technologies prévues par la SNBC dans la zone d'émissions annuelles autour de 150 MtCO<sub>2</sub>eq (telles que

3. Pour donner une valeur à ce paramètre, on part du constat que les émissions par euro de PIB se sont réduites de 2.5 % par an en moyenne au cours des dix dernières années, ce qui constitue une légère accentuation de la baisse par rapport aux deux décennies précédentes (2 % l'an). De son côté, la dépense pour le climat est évaluée, pour la France, à 41.4 milliards d'euros en 2018, soit 1.8 % du PIB, en légère progression par rapport au début de la décennie (34.4 milliards d'euros soit 1.6 % du PIB). C'est sur cette base que nous pouvons estimer une valeur  $\varepsilon = 1.5$ , égale au ratio entre la réduction moyenne de l'intensité carbone du PIB sur 2013-2018 (2.5 %) et la moyenne entre 2011 et 2017 de la dépense climat en % du PIB (1.7 %).

les véhicules légers à hydrogène) ont un coût moyen d'abattement de 450 €, assez proche du coût moyen macroéconomique pour  $\theta=1$  (370 €). De manière générale, notre hypothèse d'évolution est cohérente avec les évaluations microéconomiques disponibles.

Certaines études supposent par ailleurs la découverte d'une technologie dite « de dernier ressort » (ou *backstop*) permettant d'absorber les gaz à effet de serre, déployable à grande échelle, et constituant pour partie une alternative à la réduction des émissions. De telles technologies, notamment la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS), sont actuellement expérimentées. Elles visent à générer des émissions dites négatives de CO<sub>2</sub> en interceptant le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et en le redirigeant vers des sites de stockage géologique. Néanmoins, le chemin à parcourir pour l'utilisation généralisée d'une telle technologie reste très long, ce qui rend cette possibilité plutôt incertaine à un horizon de moyen terme. Par ailleurs, il n'y a pas de consensus sur le coût d'une telle technologie, les estimations dans la littérature allant d'une centaine à plusieurs milliers d'euros la tonne de CO<sub>2</sub>, ni sur la possibilité d'un déploiement à grande échelle. Compte tenu de notre horizon

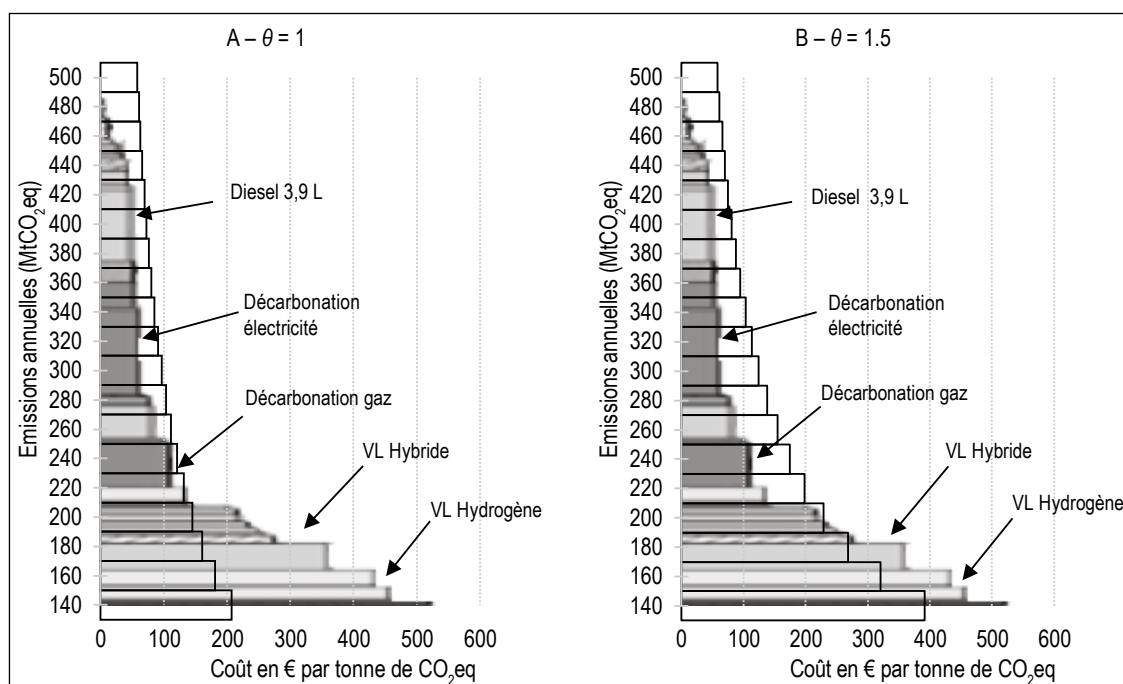
d'étude à 2050 relativement rapproché eu égard au temps d'industrialisation d'une telle technologie, nous formons l'hypothèse que son utilisation restera marginale.

#### 1.4. Optimalité et équité intergénérationnelle

Une fois la cible climatique définie, il s'agit de déterminer le chemin vers cette cible, en tenant compte de l'équité intergénérationnelle de la trajectoire de dépenses climat permettant la réduction des émissions. Quelles générations devront payer pour le climat ? Préfère-t-on faire la totalité de l'ajustement dès maintenant, quitte à baisser notre consommation par tête aujourd'hui, puis retomber sur une trajectoire croissante pour la suite, ou souhaite-t-on lisser l'ajustement sur la première décennie par exemple, si on a une préférence pour le présent plus importante ?

Il est d'usage, dans les modèles, de formaliser cette question en se plaçant dans le cadre posé par Hotelling (1931) sur l'analyse économique des ressources épuisables. La « règle d'Hotelling » stipule que la rente tirée d'une ressource épuisable doit évoluer de manière exponentielle, à

Figure III – Comparaison des courbes d'abattement moyen technico-économique (D-CAM) et macroéconomique pour les cas  $\theta = 1$  et  $\theta = 1.5$



Lecture : les barres pleines représentent les coûts moyens d'abattement des différentes technologies D-CAM calculés par le CGDD ; les barres creuses retracent le coût moyen d'abattement correspondant à notre équation macro-technologique  $\dot{\sigma}_t/\sigma_t = -\varepsilon\sigma_t^{\theta-1}\Lambda_t$ .  
 Source : Baptiste-Perrissin & Foussard (2016) pour D-CAM, calculs des auteurs.

un taux égal au taux d'intérêt, jusqu'à épuisement de la ressource<sup>4</sup>.

Cette approche débouche sur deux écueils. Tout d'abord, si les budgets carbone alloués à chaque pays en vertu de l'accord de Paris s'apparentent à une ressource épuisable, le fait qu'il existe des technologies de décarbonation revient à donner la possibilité aux pouvoirs publics d'« étendre » en quelque sorte la ressource. La règle d'Hotelling ne s'applique donc pas directement, mais cet écueil se lève facilement en intégrant au programme optimal la variable de contrôle complémentaire que constitue l'action pour le climat. Le second écueil est une forme de contradiction entre la méthode et l'objectif. L'objectif, depuis le rapport Brundtland (1987), est de promouvoir le développement durable, défini comme un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Il est paradoxal dans ce contexte de définir le programme économique correspondant comme la maximisation de la satisfaction intertemporelle des générations actuelles.

La doctrine Brundtland correspond plutôt à l'idée, formalisée par Arrow *et al.* (2012), qu'une trajectoire soutenable est une trajectoire où le bien-être ne doit pas décroître. Si on assimile la satisfaction monétaire de la génération  $t$  à  $V_t = [C_t / L_t] / (1 + \rho)^t$ , où  $\rho$  est un paramètre prenant en compte les effets sur le bien-être monétaire ressenti du seul passage du temps (Easterlin, 1974), alors, comme à l'état stationnaire  $C_t / L_t$  croît au taux  $\gamma$ ,  $V_t = [C_0 / L_0] [(1 + \gamma) / (1 + \rho)]^t$  est croissant dès lors que  $\rho$  est inférieur à  $\gamma$ , et décroissant dans le cas contraire. Plus  $\rho$  est élevé et plus le progrès technique est faible, plus les générations futures sont défavorisées. Si les pouvoirs publics visent un développement durable à la Brundtland, ils peuvent l'exprimer en fixant dans l'utilité collective un paramètre  $\rho = \gamma$ .

Une manière relativement simple d'exprimer cette idée est de définir le programme des pouvoirs publics comme la détermination du niveau des variables de contrôle (dépenses climat  $\Lambda_t$  et taux d'épargne  $s_t$ ) permettant de maximiser le bien-être monétaire, assimilé à la consommation par tête actualisée de la génération la moins bien lotie.

En termes analytiques, il s'agit de maximiser l'utilité intertemporelle définie par :

$$\max_{\Lambda_t, s_t} \left\{ \min_t [C_t / L_t] / (1 + \rho)^t \right\}$$

Lorsque ce paramètre est égal à la croissance du progrès technique et le taux d'épargne est constant sur la période, alors ce programme d'optimisation conduit également à un ratio  $\Lambda_t$  de dépenses climat sur le PIB constant sur la période. Dans ce cas précis, le chemin optimal vers la cible épouse une notion intuitive d'équité générationnelle, selon laquelle l'effort demandé à chaque date suit une répartition uniforme au cours du temps. Il s'agirait donc de réaliser l'ajustement dès la période initiale, ou à tout le moins le plus rapidement possible, puis que toutes les générations aient ensuite une dépense climat constante en points de PIB.

Avec les hypothèses décrites ci-dessus (cible d'émission exogène, loi d'évolution de l'intensité carbone et critère d'équité intergénérationnelle), nous sommes outillés pour examiner la question de la soutenabilité sous ses différents aspects, climatique comme économique. En particulier, nous définirons le concept de soutenabilité climatique de l'économie selon une approche équité/efficacité, à partir du concept de trajectoire soutenable correspondant à une trajectoire qui satisfait aux deux conditions suivantes : (i) le respect, à horizon 2050, d'un objectif plafond d'émissions annuelles de gaz à effet de serre ; (ii) une répartition dans le temps de l'effort pour le climat qui préserve les générations futures.

## 2. Des tendances d'émissions carbone actuellement incompatibles avec nos engagements climatiques

### 2.1. Trajectoires de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>

Nous décrivons pour commencer les résultats pour la France correspondant à l'hypothèse  $\theta = 1$  sur les technologies de décarbonation, c'est-à-dire, rappelons-le, où les dépenses climat atténuent

4. Le taux d'intérêt  $r$  est quant à lui déterminé par l'équation canonique d'Euler, qui s'écrit :  $r = \rho + n + \tau\gamma$  où  $\rho$  est le taux de préférence pour le présent,  $n$  le taux de croissance de la population,  $\gamma$  celui du progrès technique, tandis que  $\tau$  est l'inverse de l'élasticité de la fonction d'utilité. L'équation d'Euler résulte d'un programme d'optimisation à la Ramsey du flux d'utilité présent et futur de la consommation  $\sum_{t=0}^T \beta^t u(c_t)$ , où  $c_t$  est la consommation par unité de travail efficace (quantité de travail multipliée par la productivité globale des facteurs),  $u$  une fonction concave et  $\beta$  un facteur d'actualisation qui traduit la préférence pour le présent. Pour fixer les idées, avec un taux de préférence de 2 %, un progrès technique de 1 %, un taux de croissance de la population de 1 % et une élasticité de l'utilité de la consommation de 0.5, l'équation canonique d'Euler aboutit à un taux  $r$  de 5 %.

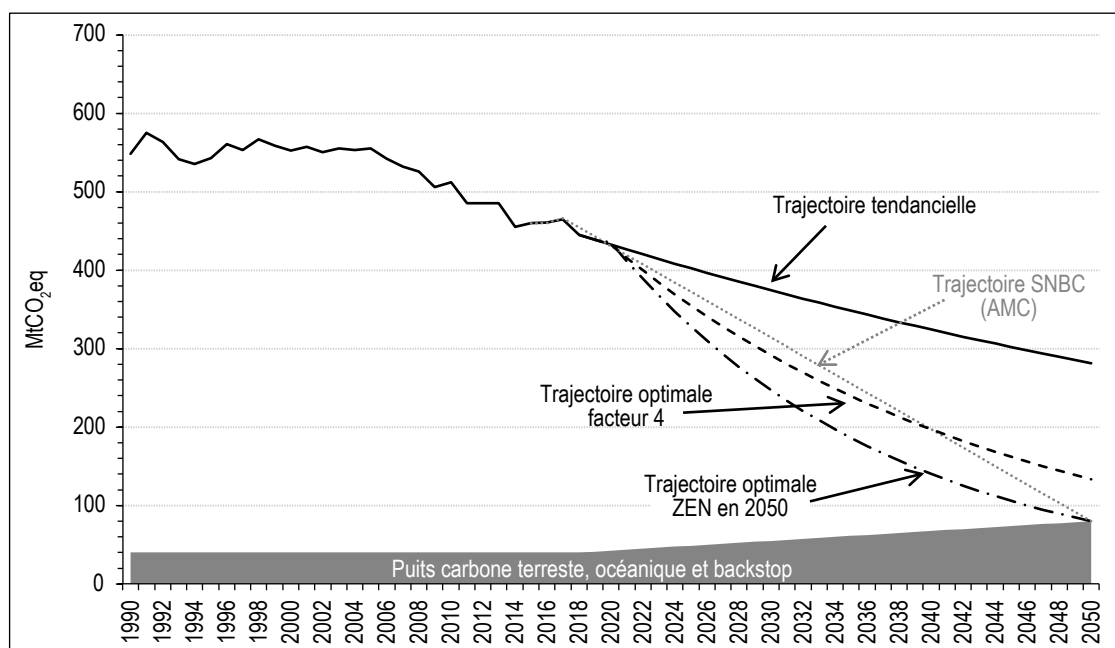
l'intensité carbone de la production selon la relation  $E_{t+1} / Y_{t+1} = E_t / Y_t (1 - \varepsilon\Lambda)$ . Cette trajectoire optimale est retracée (figure IV) pour les réductions des facteurs 4 et 7 des SNBC-1 et 2. Le graphique trace également (a) la trajectoire tendancielle établie sous l'hypothèse d'une croissance de 1.5 % l'an et d'une baisse de l'intensité carbone correspondant au maintien de l'effort climat actuel et (b) la trajectoire AMC telle que notifiée à la Commission européenne (scénario avec mesures complémentaires envisagées mais non encore votées). Les cumuls des émissions par sous période sont également fournis en niveau dans le tableau 1. On précise que les émissions dont il s'agit sont dans tous les cas les émissions sur le territoire national, encore appelées « inventaire national ». Ces émissions sont celles qui font l'objet d'engagements internationaux et c'est à ce titre qu'elles sont retenues dans cet article, mais elles sont à distinguer de la notion d'« empreinte carbone », qui mesure les émissions liées à notre mode de vie, incluant donc les émissions de gaz à effets de serre associées à nos importations.

Les réalisations passées et la trajectoire tendancielle apparaissent nettement au-dessus des deux trajectoires optimales facteur 4 et 7 et des budgets prévus par les SNBC. Le premier budget de la SNBC-1 a été légèrement dépassé

(458 MtCO<sub>2</sub> contre 440 MtCO<sub>2</sub> programmé), et surtout le scénario tendanciel divergerait ensuite nettement des trajectoires programmées : 2030 se situerait à 68 % du niveau de 1990 au lieu des 57 % de la SNBC-2 et 2050 serait 3.5 fois au-dessus de l'objectif de neutralité carbone (281 MtCO<sub>2</sub>eq contre 80 MtCO<sub>2</sub>eq programmés). Par ailleurs, le scénario AMC notifié à la Commission européenne respecterait l'objectif de neutralité carbone, mais avec un rythme quasi-linéaire, et donc différent du scénario optimal d'équité intergénérationnelle défini précédemment.

À l'état régulier, il est possible de formuler une règle simple qui permet de jauger si la trajectoire carbone respecte sa cible en s'affranchissant de la résolution analytique d'un modèle. Dans ce cas, l'activité économique croît au taux constant  $g$ , et la trajectoire optimale d'émissions carbone telle que nous venons de la définir, obéit à une loi simple de décroissance à un taux constant que nous notons  $\Gamma$ . En effet, si la dépense pour le climat représente une part  $\Lambda$  constante du PIB, alors l'intensité carbone  $\sigma$  décroît au taux constant de  $\varepsilon\Lambda\%$ , puisque  $d\sigma / \sigma = -\varepsilon\Lambda$ . Par suite, les émissions de GES décroissent au taux constant de  $\Gamma = \varepsilon\Lambda - g$ . La valeur qu'il faut donner à  $\Gamma$  se déduit alors directement

Figure IV – Trajectoires de réduction des gaz à effet de serre en France



Lecture : sous l'hypothèse de réduction d'un facteur 4 des émissions à l'horizon de 2050, les émissions de 2030 devraient représenter 53 % de celles de 1990. A la même date, ce pourcentage devrait être de 45 % pour une cible de zéro émission nette en 2050 alors que la trajectoire tendancielle conduit à prévoir un ratio de 68 %.

Source : CITEPA, calculs des auteurs.



Tableau 1 – Budgets carbone programmés, tendanciels et optimaux par sous-période

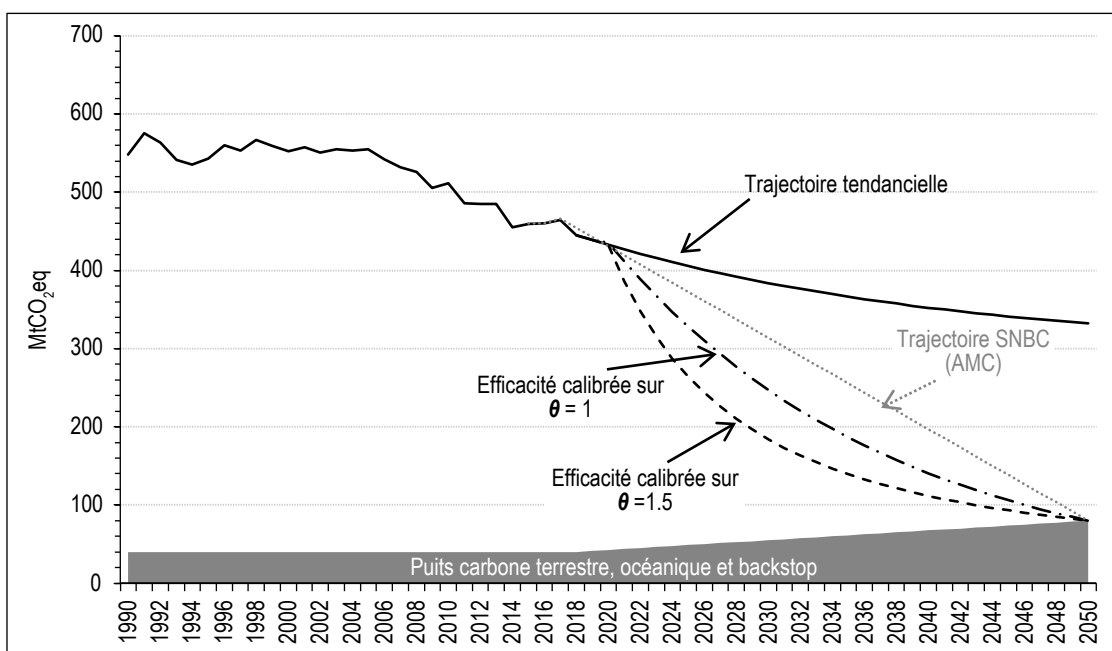
Période	Émissions programmées (stratégie bas carbone)	Émissions effectives et tendanciels	Émissions optimales (facteur 4 en 2050)	Émissions optimales (neutralité en 2050)
2015-2018 (1 <sup>er</sup> budget*)	422	458	458	458
2019-2023 (2 <sup>e</sup> budget*)	399	427	417	408
2024-2028 (3 <sup>e</sup> budget*)	359	397	346	311
2029-2033 (4 <sup>e</sup> budget**)	300	369	285	234
2034-2038 (AMC***)	244	343	235	177
2039-2043 (AMC***)	185	320	194	133
2044-2048 (AMC***)	127	298	160	101
2050 (AMC***)	80	281	137	80

Source : \*SNBC2015, \*\*SNBC2020, \*\*\*Projection gouvernementale 2019 avec mesures complémentaires.

du facteur  $F$  de réduction des GES par rapport à l'année de départ, et du nombre d'années  $T$  avant l'échéance fixée, la condition  $(1 + \Gamma)^T = F$  conduisant à  $\Gamma = F^{1/T} - 1$ . Ainsi pour la France, où il s'agit de réduire les émissions de 439 à 80 MtCO<sub>2</sub>eq de 2019 à 2050, soit  $F = 5.48$  pour une durée  $T$  de 31 ans,  $\Gamma = 5.48^{1/31} - 1 = 5.6\%$ . Ceci signifie que dès lors que les émissions se réduisent de moins de 5.6 % par an, la soutenabilité climatique n'est pas assurée au sens, où soit la neutralité carbone ne sera pas atteinte dans les délais, soit l'effort est trop reporté dans le temps.

Cette règle d'apparence comptable ne l'est pas entièrement : il s'agit bien d'aller d'un point A à un point B dans un temps  $T$ , mais avec un rythme de progression découlant de la règle d'équité définie plus haut, constante en pourcentage et donc, en niveau, plus rapide au début et plus lente à la fin que la ligne droite. Elle est néanmoins très utile pour fixer les idées et ordres de grandeur, puisqu'elle nous indique de combien il faudrait immédiatement et durablement baisser les émissions pour revenir sur une trajectoire soutenable (de manière analogue aux indicateurs de soutenabilité en finances publiques, comme le *tax gap*).

Figure V – Trajectoires optimales vers la neutralité carbone en fonction de l'efficacité des technologies de décarbonation



Source : CITEPA, calculs des auteurs.

Prendre la variante  $\theta = 1.5$  sur les technologies de décarbonation supposerait une répartition de l'effort légèrement modifiée (cf. figure V). Dans ce cas, la règle qu'on vient d'énoncer ne s'applique pas, le taux de réduction n'est pas constant, et il faut avoir recours aux simulations. Sans surprise néanmoins, le profil baissier de la nouvelle trajectoire est plus accusé en début de période.

On peut revenir ici sur les préconisations formulées dans le rapport Stiglitz pour la mesure de la soutenabilité (Stiglitz *et al.*, 2009). Il recommandait que les « aspects environnementaux de la soutenabilité fassent l'objet d'une batterie d'indicateurs physiques incluant un indicateur signalant clairement dans quelle mesure nous approchons de niveaux dangereux d'atteinte à l'environnement ». Le suivi des émissions de GES répond parfaitement à cet objectif pour ce qui concerne l'enjeu climatique et il véhicule un message qui apparaît ici sans appel : sur le plan climatique, notre trajectoire n'est pas soutenable. La France, qui n'est pourtant pas la plus mal placée parmi les pays les plus riches, émet dix fois plus de GES (439 MtCO<sub>2</sub>eq) qu'elle n'en absorbe (40 MtCO<sub>2</sub>). Les projections montrent une tendance probablement baissière dans les années à venir, mais nettement insuffisante pour un retour à l'équilibre à l'horizon nécessaire. Au niveau mondial, la situation apparaît encore plus critique : la tendance est haussière alors qu'il faudrait diviser d'un facteur 4 les émissions à

horizon 2050 pour contenir le réchauffement à 1.5°C.

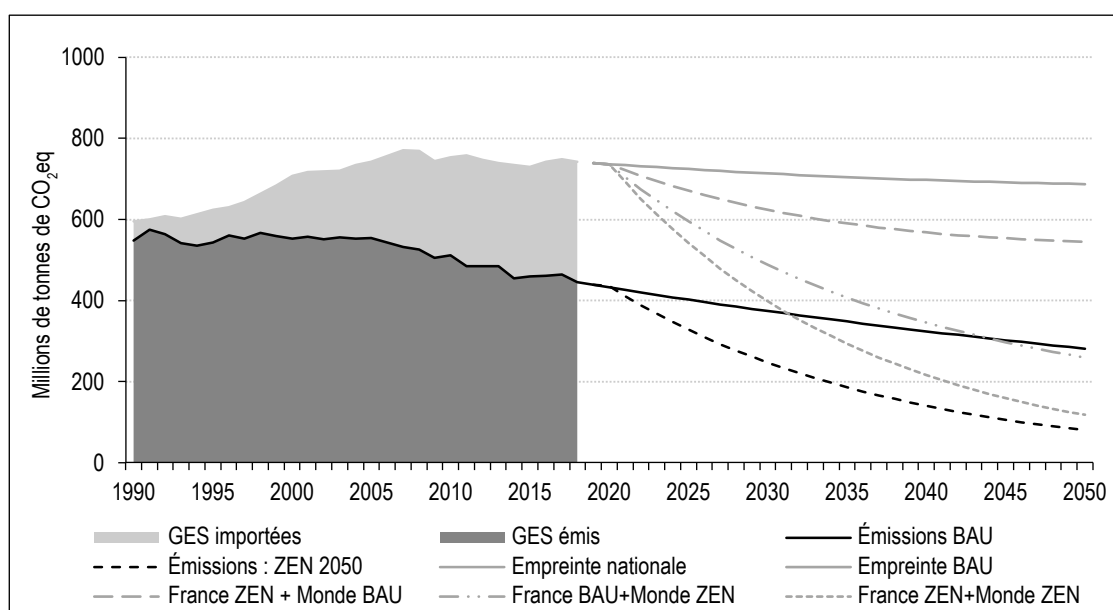
Enfin, il convient de rappeler que, malgré une baisse de l'inventaire carbone, l'empreinte de la France a continué à augmenter, ce qui signifie que les émissions produites sur le territoire ont été substituées progressivement par des émissions importées. La figure VI montre les différentes projections possibles selon que la France (France ZEN + Monde BAU), le reste du monde (France BAU + Monde ZEN) ou les deux (France ZEN + Monde ZEN) respectent les cibles climatiques de neutralité carbone à horizon 2050 (cf. Annexe en ligne C1, lien vers les Annexes en ligne à la fin de l'article).

## 2.2. Dépense pour le climat

Les trajectoires de retour à la neutralité carbone ayant été établies, notre modèle permet de chiffrer directement les coûts à payer pour les respecter. Pour la France, les dépenses annuelles associées à la trajectoire optimale s'élèveraient à 4.5 % du PIB, soit autour de 100 milliards d'euros<sup>5</sup>, ce qui représente plus d'un facteur 2 par rapport à la dépense actuelle évaluée, pour l'État, les entreprises et les ménages, à un peu plus de 45 milliards d'euros en 2018 (1.9 % du PIB) par l'Institut de l'économie pour le climat

5. Très précisément 105 milliards en 2019, qui évolueraient ensuite comme le PIB en valeur.

Figure VI – Inventaire et empreinte carbone de la France



Sources: Insee et CITEPA, calculs des auteurs.

(I4CE, 2019). Il s'agit d'un effort important, mais pas hors d'atteinte : rapporté à la population, le montant annuel est d'environ 1 500 € contre 600 € actuellement.

Nous pouvons, là encore, mettre en évidence pour les économies à l'état stable une règle simple entre l'effort national carbone optimal et la croissance de l'économie. Rappelons en effet que dans ce cas et lorsque  $\theta = 1$ , le taux constant  $\Gamma$  de réduction des émissions de GES est égal à  $\varepsilon\Lambda - g$ . Par suite, l'effort qui assure le respect de la cible est de  $\Lambda^* = [g + \Gamma] / \varepsilon$ . Cette relation nous enseigne par exemple que l'effort actuel de 1.9 % du PIB, s'il n'était pas accentué dans les années à venir, ne serait compatible avec la neutralité carbone en 2050 qu'en cas de décroissance du PIB au rythme de 2.7 % l'an<sup>6</sup>.

Ces résultats sont sensibles aux hypothèses retenues, notamment concernant les technologies de décarbonation, la règle de répartition intergénérationnelle de l'effort, mais aussi le taux de croissance de l'économie considéré comme exogène dans ce modèle. Le tableau 2 illustre la sensibilité du niveau de l'effort annuel nécessaire en fonction des scénarios de croissance et d'efficacité énergétique<sup>7</sup>. Ainsi, la dépense climat annuelle peut passer de l'ordre de 65 Mds d'euros de 2018 (croissance nulle et efficacité optimiste) à 165 Mds (croissance de 1.5 % et efficacité prudente).

Au niveau mondial, bien que le facteur de réduction des émissions pour atteindre la neutralité carbone soit légèrement inférieur à celui qui est requis pour la France, la croissance projetée est supérieure et au final, l'effort financier mondial serait du même ordre et même légèrement supérieur à celui à entreprendre nationalement, en points de PIB : notre modèle aboutit à un taux d'effort climat de 5.1 % du PIB mondial, à comparer aux 4.5 % au niveau national. En revanche, le changement d'échelle est beaucoup plus important, la dépense mondiale pour le

climat étant en toute vraisemblance actuellement inférieure à 1 % du PIB mondial<sup>8</sup>.

### 2.3. Stratégies d'épargne

Pour finir cette section, nous examinons ici quatre variantes qui s'affranchissent de l'hypothèse d'un taux d'épargne constant et font varier les règles d'évolution de la consommation et de l'effort climat (figure VII).

La première colonne (scénario S1) correspond aux trajectoires que nous avons décrites jusqu'ici : dès lors que le taux d'épargne exogène est constant, le PIB comme le capital restent sur leur sentier de croissance régulière, d'où un ratio  $K/AL$  constant, où  $AL$  représente le travail augmenté du facteur de progrès technique. De même, par construction, la consommation par unité de travail efficace reste constante après l'ajustement initial, ce qui implique un niveau de vie actualisé  $V_t = \beta^t C_t / L_t$  constant, avec  $\beta = \frac{1}{1 + \rho}$ .

Les scénarios S2 et S3 maintiennent l'hypothèse d'un taux d'effort climatique constant, mais avec un taux d'épargne endogène qui varie au cours du temps. Plus précisément, ce taux d'épargne est la résultante du choix de consommation découlant d'un programme d'optimisation intertemporelle. Les deux scénarios diffèrent dans le choix de la fonction d'utilité qui sera maximisée (cf. Annexe en ligne C2). Pour le deuxième scénario (S2), il s'agit d'une optimisation de type maximin qui implique une consommation par unité de travail efficace constante, une fois

6. En effet,  $g = \varepsilon\Lambda - \Gamma = 1.5 * 1.9\% - 5.6\% = -2.75\%$

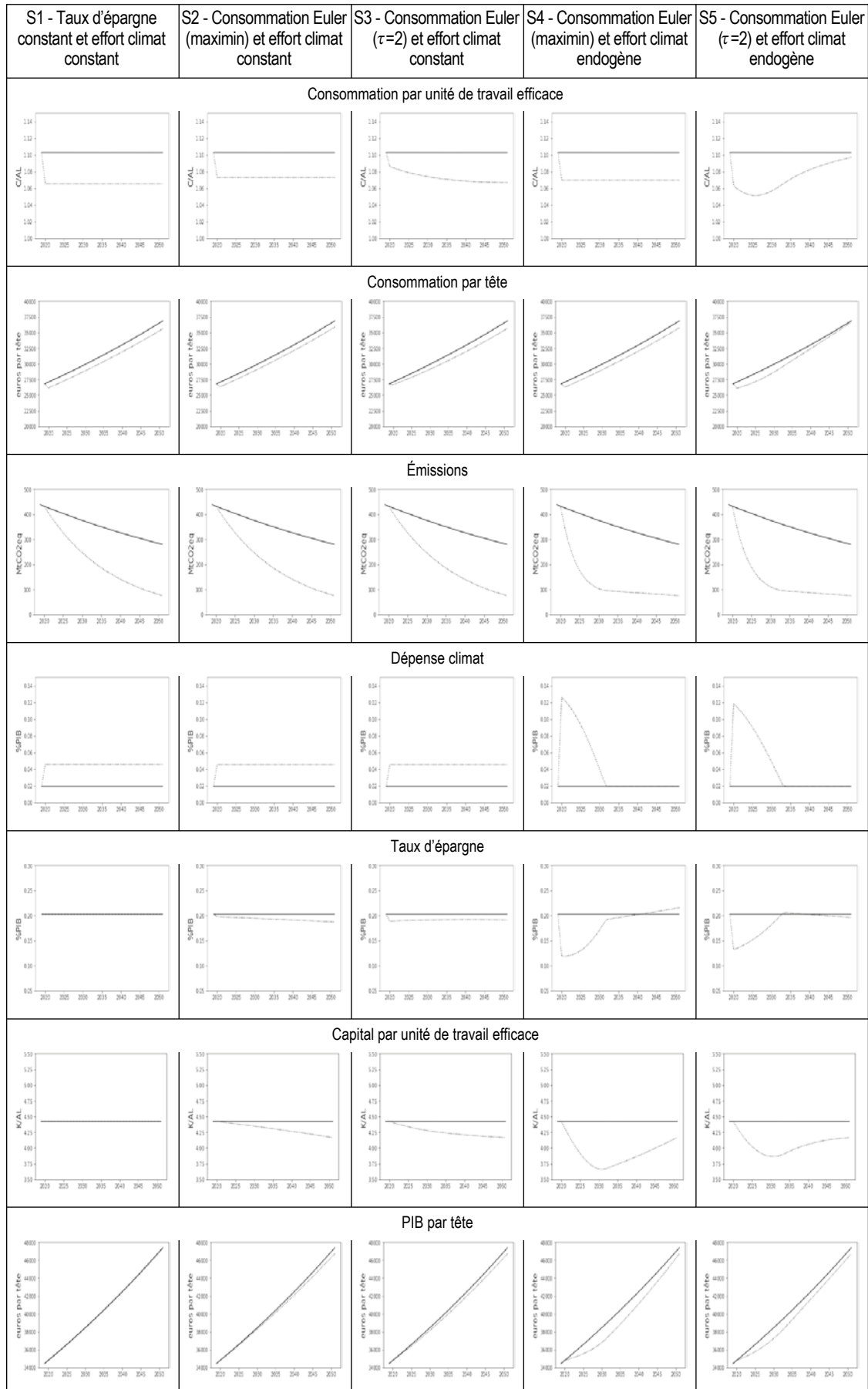
7. On teste les résultats pour une valeur de  $\varepsilon$  allant de 1 (scénario prudent) à 2 (scénario optimiste), le scénario dit « central » correspondant à  $\varepsilon = 1.5$ .

8. 681 milliards de dollars en 2016 selon le rapport 2018 du Standing Committee on Finance (SCF) de la Conference of the Parties (COP) de la CCNUCC (SCF, 2018), pour un PIB mondial de 76 000 milliards de dollars soit 0.9 %. À noter que ce chiffre est cohérent avec une valeur de  $\varepsilon_M = 1.5$  puisqu'elle implique une réduction de l'intensité carbone de  $0,9 * 1,5 = 1.25$  l'an ce qui est peu ou prou la tendance observée (-1.2 % l'an au cours sur la période 2008-2018).

Tableau 2 – Sensibilité des dépenses climat (en % du PIB et en Md€ de 2018) aux hypothèses de croissance et d'efficacité énergétique

Scénario de croissance \ Scénario d'efficacité énergétique	Scénario de croissance		
	1.5 %	1.0 %	0.0 %
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€)

Figure VII – Trajectoires économiques et climatiques selon différents scénarii d'épargne



l'ajustement initial réalisé. Le taux d'épargne se réduit progressivement pour amener le capital sur son nouvel état régulier<sup>9</sup>, ce qui se traduit un léger décrochage progressif du PIB par tête par rapport à la trajectoire de référence S1. Dans le troisième scénario (S3), les consommateurs cherchent à maximiser  $\sum_{t=0}^T \beta^t \frac{c_t^{1-\tau}}{1-\tau}$ , avec un paramètre  $\tau$  fini<sup>10</sup> impliquant une substitution entre consommation présente et future (contrairement à l'approche Brundtlandienne des pouvoirs publics qui correspond à  $\tau$  infini). Ils choisissent de réduire plus fortement leur épargne en début de période pour lisser la perte de consommation engendrée par un effort climat constant sur toute la période.

Les quatrième et cinquième scénarios (S4 et S5) rendent endogène le taux d'effort climat. La différence entre les scénarios S4 et S5 réside dans la règle d'évolution de la consommation par unité de travail efficace résultant soit d'un programme d'optimisation de type maximin (S4), soit de celui de consommateurs plus impatient (S5). Si le point d'arrivée est le même concernant tant les émissions que le capital cible, des arbitrages dans le temps peuvent être opérés entre investissement, effort climat et consommation. La trajectoire optimale correspond à une décarbonation beaucoup plus rapide, avec une neutralité carbone atteinte à l'horizon 2030 ; ceci suppose un effort climat plus élevé jusqu'à cet horizon dans le scénario de référence, plus bas ensuite. La croissance du PIB par tête, comme du capital par tête, est ralentie avant, lorsque la décarbonation est accomplie, de reprendre son cours vers le nouvel état régulier. Cette dernière trajectoire, par l'ampleur des ajustements qu'elle implique, n'est sans doute pas la plus probable, mais elle a le mérite de montrer la possibilité, sans pénaliser les niveaux de vie, en agissant sur le taux d'épargne, d'une réduction plus rapide des émissions de CO<sub>2</sub> – et donc, limitant davantage, le réchauffement climatique.

Tous les scénarios présentés ici affichent une réduction de la consommation par tête la première année lors de l'ajustement initial, du fait d'une augmentation significative de l'effort climat. Cet effort initial sur la consommation est ensuite largement compensé par une augmentation de la consommation par tête tendancielle au rythme du progrès technique. Néanmoins, pour prévenir le risque que la croissance soit moins forte que prévue, ou la décarbonation plus chère, il y a bien un intérêt à avancer les efforts climats en début de période. Si notre fonction d'utilité nous invite à faire la

totalité de l'effort d'ajustement le plus rapidement possible, l'ajustement peut également être lissé sur quelques années pour éviter le choc de départ sur la consommation par tête.

### 3. Un nouveau prix du carbone rehaussé, en phase avec l'objectif de neutralité carbone en 2050

#### 3.1. Valeur sociale de l'action pour le climat

À partir des évaluations de coût global des stratégies de décarbonation, il est ensuite possible de déterminer un prix du carbone. On sait que les mécanismes de marché ne sont que de peu d'utilité pour donner une valeur au coût des émissions de CO<sub>2</sub>. La raison fondamentale est que le CO<sub>2</sub> n'a pas de coût d'extraction, contrairement par exemple aux industries gazières et minières : parce qu'il ne se vend, ni ne s'achète, le CO<sub>2</sub> n'a pas de prix. Il existe bien, depuis 2005, un marché européen de quotas de CO<sub>2</sub>, le Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQUE). Mais d'une part, il concerne seulement 5 000 entreprises environ, représentant 45 % des émissions, et d'autre part, les quotas qui leur sont alloués sont insuffisamment contraignants pour que le prix sur ce marché puisse refléter une valeur sociale. Ainsi, entre 2013 et 2018, les quotas de CO<sub>2</sub> appelés UEA (*European Union Allowances*) se sont négociés à autour de cinq euros la tonne de CO<sub>2</sub>.

À quel niveau alors fixer le prix du carbone ? Il faut en revenir aux fondamentaux de l'économie du climat. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont un coût parce qu'elles sont responsables du réchauffement climatique, et donc induisent des dommages sur l'économie. L'action pour le climat à une valeur parce qu'en investissant dans les technologies de décarbonation, elle évitera aux générations futures de subir les conséquences négatives, maintenant très bien documentées, de la hausse de la température. C'est pour cela que la commission Quinet a préféré le terme de « valeur sociale de l'action pour le climat » (Quinet, 2019).

Ce principe général posé, le terme de prix « social » du carbone peut recouvrir un grand

9. Dès lors que le taux d'épargne est endogène, il faut, pour résoudre le programme optimal des pouvoirs publics, définir quelle est la cible économique de sortie. Nos simulations reposent ici sur l'objectif que l'économie, soit en 2050, à son nouvel état régulier, intégrant un effort permanent de décarbonation permettant de maintenir les émissions brutes au niveau du puits carbone.

10.  $\tau$  fixé à 2, valeur standard de la littérature.

nombre de 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. Parler de prix social nécessite avant tout de clarifier ce que l'on entend par « social », autrement dit quel est l'objectif fixé par la société en matière climatique, auquel la fixation de ce prix public peut contribuer. Il y a essentiellement deux approches : une approche « comptable » et une approche « coût ». La première approche, fondée sur le partage volume-prix de la dépense climat optimale, consiste à diviser celle-ci par les émissions courantes, permettant ainsi de 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 notion consiste à diviser la dépense climat par le flux cumulé des émissions actuelles et futures évitées. On est là dans une logique d'incitations à l'évolution des comportements des agents économiques vers des modes non carbonés : c'est l'optique choisie par le rapport de la commission Quinet, visant à intégrer la dimension climatique dans la mesure du coût socio-économique des investissements.

Les deux notions sont bien évidemment liées, et peuvent être mise en cohérence. Nous mettons néanmoins en avant la première, qui nous semble plus opérante et robuste étant donné l'incertitude sur la mesure du flux cumulé des émissions actuelles et futures évitées, et notamment son actualisation.

Dans la pratique, la valeur sociale du carbone couvre un ensemble de politiques pour le climat très variées, allant de la taxe carbone aux quotas d'émissions en passant par l'imposition de normes thermiques pour les bâtiments dont le coût est couvert pour partie par les propriétaires et pour partie par des aides publiques type réduction d'impôt, au financement de transports en commun par les collectivités locales et leurs autorités de transport. Confondre valeur sociale du carbone et taxe carbone, c'est confondre les politiques de lutte contre le réchauffement climatique et leur financement. À ce jour, en France comme partout ailleurs, les taxes carbonées ne représentent d'ailleurs qu'une part minoritaire de l'effort pour le climat.

### 3.2. Estimations du coût social du carbone

Le sens de la notion de valeur sociale de l'action climat – ou de coût social du carbone – ayant été précisé, son calcul découle directement de sa définition puisque cette valeur, au sens

de l'approche « comptable », doit vérifier en tout point de la trajectoire optimale l'égalité :  $P_t^{co2} E_t^* = \Lambda_t^* Y_t^*$  où  $E_t^*, Y_t^*$  et  $\Lambda_t^*$  désignent respectivement les émissions, le PIB et l'effort climat le long de cette trajectoire. Ainsi posée, le prix social du carbone s'établirait pour la France à environ 250 € en 2020, 500 € en 2030, 1010 € en 2040 et 2050 € en 2050 pour l'objectif de neutralité carbone (voir tableau 3).

Les modèles utilisés nationalement comme ceux auxquels recourt le GIEC tendent à produire des évaluations encore plus élevées. Nos estimations pour l'objectif de neutralité carbone correspondent à un quasi-doublement de la valeur sociale du carbone par rapport à l'objectif facteur 4 qui prévalait jusqu'en 2018. On peut le comprendre aisément si l'on revient à la formation de cette valeur : puisque  $P_t^{co2} E_t^* = \Lambda_t^* Y_t^*$ , on peut décomposer le ratio des prix  $P_t^{F7} / P_t^{F4}$  comme un produit  $[\Lambda_*^{F7} / \Lambda_*^{F4}] \times [E_t^{*F4} / E_t^{*F7}] \times [Y_t^{*F7} / Y_t^{*F4}]$ . Dans un scénario où les deux trajectoires de PIB seraient les mêmes, on a bien  $P_{2050}^{F7} / P_{2050}^{F4} = 7 / 4 \times [\Lambda_*^{F7} / \Lambda_*^{F4}]$ . Comme l'effort  $\Lambda_*^{F7}$  est de toute évidence plus élevé<sup>11</sup> que celui,  $\Lambda_*^{F4}$ , correspondant à un facteur 4,  $P_{2050}^{F7}$  est approximativement égal à  $2 \times P_{2050}^{F4}$ . Insistons sur le fait que ce doublement du prix ne signifie pas pour autant un doublement de la dépense optimale climat car, dans le même temps, la trajectoire de réduction des GES est aussi plus rapide<sup>12</sup>.

Si l'on mesure maintenant le prix social du carbone, au sens de l'approche « coût » et avec un facteur d'actualisation de 5 % sur la mesure des émissions futures évitées, nous obtenons les valeurs de 127 € en 2020, 258 € en 2030, 522 € en 2040 et 1057 euros en 2050. Les ordres de grandeurs sont très proches de ceux proposés par le rapport Quinet, à savoir 250 € en 2030, 500 € en 2040 et 775 € en 2050 pour ce même objectif de neutralité carbone<sup>13</sup>. Nos simulations tendent donc à valider la très forte revalorisation qu'opérait la commission Quinet (Quinet, 2019) par rapport aux estimations communément admises antérieurement, comme par exemple

11. Pour la France,  $\Lambda_*^{F7} = 4.5\%$  et  $\Lambda_*^{F4} = 3.5\%$ .

12. Pour la France,  $\Lambda_*^{F7} / \Lambda_*^{F4} = 4.5 / 3.5 = +28\%$  ;

$P_{2050}^{F7} / P_{2050}^{F4} = 7 / 4 \times [4.5 / 3.5] = 2.25$ .

13. Si la commission Quinet réévalue le prix social du carbone à l'aune du nouvel objectif de neutralité, elle a estimé que la robustesse des résultats des modèles technico-économiques et macro-sectoriels utilisés s'émoussent à partir de l'horizon 2040, voire 2030, et a donc décidé de plafonner le prix ensuite au regard des incertitudes technologiques à moyen terme.

celle proposée en 2017 par la commission Stiglitz-Stern qui était de 70 € à 100 € en 2030 (Stiglitz *et al.*, 2017)<sup>14</sup>, sans parler des valeurs encore retenues par la Banque Mondiale (World Bank, 2011) ou le PNUDD (ONU-IHDP, 2012) : 30 \$ ou 25.5 €, pour le calcul de l'épargne nette et de l'épargne nette ajustée sur lesquelles on revient plus loin, qui paraissent hors d'échelle.

Enfin, nous estimons un prix mondial du carbone, qui n'est a priori pas le même que le prix national. En effet, si l'on repart de la définition de la valeur sociale du carbone, le ratio entre le niveau mondial et le niveau national s'écrit<sup>15</sup> :  $P_t^{MD} / P_t^{FR} = [\Lambda_*^{MD} / \Lambda_*^{FR}] [\sigma_t^{*FR} / \sigma_t^{*MD}]$ . Or si, on l'a vu, les efforts climat mondiaux et nationaux représentent une proportion du PIB comparable (respectivement 5.1 % et 4.5 %), il n'en va pas de même de l'intensité carbone (ratio CO<sub>2</sub>/PIB), qui est de 720 g/€ de PIB<sup>16</sup> au niveau mondial contre 189 g/€ en France soit un rapport de 1 à 3.8. La valeur mondiale ressort de nos simulations à 161 € la tonne de CO<sub>2</sub> en 2030, et 359 € en 2040, et 801 € en 2050, globalement en cohérence avec les simulations du GIEC. En effet, les valeurs moyennes GIEC pour l'objectif de limitation à 1.5°C (i.e. scénario avec une probabilité de 33 % de dépasser les

1.5°C), objectif qui nécessiterait d'atteindre la neutralité carbone en 2050, ressortent à 284 € en 2030 et 497 € en 2040, et 872 € en 2050.

### 3.3. Comptabilité du prix du carbone

Poursuivant notre entreprise d'expression de règles simplifiées dans l'hypothèse de croissance stable au taux  $g$ , nous pouvons établir deux nouvelles règles concernant la valeur de l'action pour le climat au sens de l'approche « comptable ». Pour obtenir une réduction  $\Gamma$  des émissions à une date donnée, il faut en effet, si le PIB croît au taux  $g$ , une réduction de l'intensité carbone de la production au rythme de  $d\sigma / \sigma = \Gamma + g = r$ . Ceci requiert, dès lors que  $d\sigma / \sigma = -\Lambda\varepsilon$ , une dépense climat constante en points de PIB de  $\Lambda = r / \varepsilon$ . On en déduit un prix initial qui est égal à la dépense initiale rapportée aux tonnes de GES émis,  $P_0^{CO_2} = (r / \varepsilon) \times (Y_0 / E_0)$ .

14. Les auteurs ont néanmoins pris soin de préciser que leur estimation ne recouvrait qu'une partie de la valeur sociale du carbone : "This commission concludes that the explicit carbon-price level consistent with achieving the Paris temperature target is at least US\$40–80/tCO<sub>2</sub> by 2020 and US\$50–100/tCO<sub>2</sub> by 2030, provided a supportive environment policy is in place" (Stiglitz *et al.* 2017, p. 3).

15. En effet,  $P_t^{MD,FR} = \Lambda_*^{MD,FR} Y_t^{MD,FR} / E_t^{MD,FR} = \Lambda_*^{MD,FR} / \sigma_t^{MD,FR}$

16. Le ratio est de 613g/\$, soit, sous l'hypothèse de dollar à 0.85 euro, 720g/€.

Tableau 3 – Valeur sociale de l'action pour le climat pour l'objectif de neutralité carbone en 2050

	2020	2030	2040	2050
Valeurs nationales (€/tCO <sub>2</sub> eq)				
Résultats du modèle				
Approche « comptable »	247	501	1 014	2 052
Pour mémoire, avec l'objectif Facteur 4 en 2050	188	320	547	937
Approche « coût » (taux d'actualisation 5 %)	127	258	522	1 057
Valeurs retenues par la Commission Quinet 2019				
Approche « coût »	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	3 515
Modèle TIMES		228	465	2 451
Valeurs mondiales (€/tCO <sub>2</sub> eq)				
Résultats du modèle				
Approche « comptable »	72	161	359	801
Estimations GIEC				
GIEC 1.5°C		284	497	872
GIEC 2°C		139		440

(\*) Valeur pour 2045.

Source : Commission Quinet (2019), calculs des auteurs.

À une date quelconque, ce même prix sera en  $P_t^{co2} = (r/\varepsilon) \times (Y_t/E_t) = (rY_0 e^{gt}) / (\varepsilon E_t e^{-\Gamma t})$  soit encore  $P_t^{co2} = P_0^{co2} e^{rt}$  et un prix qui croît donc au taux  $r$ , cette croissance reflétant la difficulté croissante à poursuivre la réduction des émissions à mesure que l'intensité carbone s'abaisse.

On peut donc énoncer deux nouvelles règles. La première est que, à la date initiale, la valeur sociale du carbone est au moins égale à  $P_0^{co2} = (r/\varepsilon) \times (Y_0/E_0)$ , où  $Y_0$  et  $E_0$  sont respectivement le PIB et les émissions de CO<sub>2</sub> initiales. La seconde est que, le long de cette trajectoire, la valeur sociale du carbone suit une loi de progression exponentielle au taux  $r = g + \Gamma$  où  $g$  est le taux de croissance du PIB et  $\Gamma$  le pourcentage de réduction annuel des émissions cible<sup>17</sup>.

Cette dernière règle s'apparente à une règle d'Hotelling qui stipule que le prix d'une ressource rare doit évoluer de manière exponentielle pour compenser la raréfaction. Elle en précise le taux d'évolution. Dans le cas français, ce taux est de 7.4 % pour l'objectif facteur 7 et 5.5 % pour l'objectif facteur 4. À titre de comparaison, la commission Quinet retient un taux de 7.2 % entre 2030 et 2040 et les moyennes des simulations utilisées par le GIEC correspondant à  $r=5.5\%$  entre 2030 et 2050 (cf. tableau 3) ; a contrario, les taux sous-jacents de TIMES, POLES, NEMESIS, ThreeME sont nettement plus élevés (entre 12 et 13 % pour les trois premiers et 16 % pour ThreeME) témoignant soit d'une règle d'équité moins favorable aux générations futures, soit d'une vision plus optimiste concernant la progressivité des coûts de décarbonation, soit une combinaison des deux effets.

### 3.4. Vers un concept de dette climatique ?

Une fois défini le coût social du carbone il devient possible d'envisager plusieurs indicateurs monétaires pour décrire la situation climatique, en commençant par deux indicateurs de « dette climatique ».

On peut dans un premier temps se placer dans une approche prospective, c'est-à-dire s'intéresser aux coûts à payer dans le futur pour revenir à la trajectoire cible, soit à la somme cumulée actualisée des dépenses climat futures pour parvenir à la cible. Autrement dit, il s'agit du montant de ressources financières qu'il faudrait avoir en réserve pour respecter la cible sans avoir à ponctionner les revenus futurs. 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. Nous parlerons ici de dette climatique implicite pour désigner cet indicateur<sup>18</sup>. C'est en effet une notion prospective, analogue à la notion d'engagements implicites utilisée pour d'autres types de dépenses publiques comme les retraites, l'équivalent actualisé du flux de dépenses futures nécessaires à honorer un engagement donné. Dans le scénario de neutralité carbone en 2050, avec un taux de préférence pour le présent égal au taux de croissance de l'économie, la dette climatique implicite s'élève à d'environ 150 % du PIB de 2018, et peut se mesurer au premier ordre simplement par le nombre d'années pour atteindre la neutralité multipliée par la dépense climat annuelle en point de PIB.

Une autre approche pour la « dette climatique » serait de nature rétrospective : il s'agirait alors de mesurer les coûts non payés du passé, car c'est souvent en ces termes qu'on exprime la charge que l'inaction passée conduit à léguer aux générations futures. Cette dette n'ayant pas de créancier ni de débiteur, sa définition est normative. Néanmoins, dès lors que l'on définit pour l'avenir une valeur de l'action climat, celle-ci est un candidat naturel pour valoriser l'insuffisance des efforts passés. Nous proposons en conséquence de définir l'endettement climatique comme la somme des émissions nettes passées valorisées au prix social actuel du carbone, au sens de l'approche « comptable »<sup>19</sup>. Ceci correspond à l'idée simple que, quel que soit le moment où le CO<sub>2</sub> a été émis, il contribue de la même manière au dérèglement climatique<sup>20</sup> et donc doit être valorisé au même niveau. Ce concept peut également être rapproché de l'idée de dette 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. Il ressort un chiffrage de l'endettement climatique depuis 1990 de 3 475 Mds €, soit proche lui aussi de

17.  $\Gamma = F^{int} - 1$ , voir plus haut.

18. La dette implicite est une somme cumulée à ne pas confondre avec l'effort d'atténuation annuel. À titre d'analogie, si l'on fait la différence entre l'effort d'atténuation annuel en point de PIB et l'effort effectivement réalisé aujourd'hui, on se rapproche de la notion de tax gap ou d'écart de financement actualisé qui traduit le montant en points de PIB d'amélioration du solde structurel qu'il faudrait effectuer de manière pérenne pour ramener la dette publique sur une trajectoire soutenable.

19. Formellement, à la date  $t_0$ , on définit sa variation cumulée  $\Delta D_{t_0}^{\bar{T}}$  par

$$\text{rapport à une date initiale } \bar{T} \text{ par } \Delta D_{t_0}^{\bar{T}} = \int_{t_0}^{t_1} P_0^{co2} (E_s - \bar{E}) ds$$

où  $E_s$  sont les émissions de GES à la date  $s$  et  $\bar{E}$  le puits carbone terrestre et océanique. La dette financière climatique peut donc se calculer simplement comme la somme des émissions nettes cumulées (« dette physique »), multipliée par la valeur sociale du carbone.

20. Ceci revient à négliger le temps de disparition spontanée des GES, ce qui est légitime car il est effectivement très long au regard des horizons considérés ici.



150 % du PIB et représentant environ 50 000 € par habitant. Cette dette peut ensuite être projetée et comparée à un plafond d'endettement climatique correspondant par exemple au niveau permettant de respecter la cible de +2°C (figure VIII).

Les évolutions de ces deux indicateurs ne sont pas sans lien. En effet, chaque année les coûts non payés (se traduisant en émissions brutes positives) vont venir s'ajouter aux coûts à payer pour retrouver la neutralité carbone. Ils pourraient ainsi faire l'objet d'un suivi année après année, fondé sur un prix du carbone officiel fixé par la puissance publique, et actualisé à chaque changement de base des comptes nationaux. Ainsi, l'indicateur de dette climatique peut être un outil de pilotage de la puissance publique dans une optique d'équité/efficacité : il permet à la fois de mesurer l'écart à la cible de neutralité carbone et la juste répartition de l'effort entre les générations, un effort insuffisant une année devant être compensé la ou les années suivantes.

#### 4. Une épargne nette ajustée du coût social climatique désormais négative, signe d'un monde qui s'appauvrirait progressivement

##### 4.1. Au-delà du climat : les approches élargies de la soutenabilité

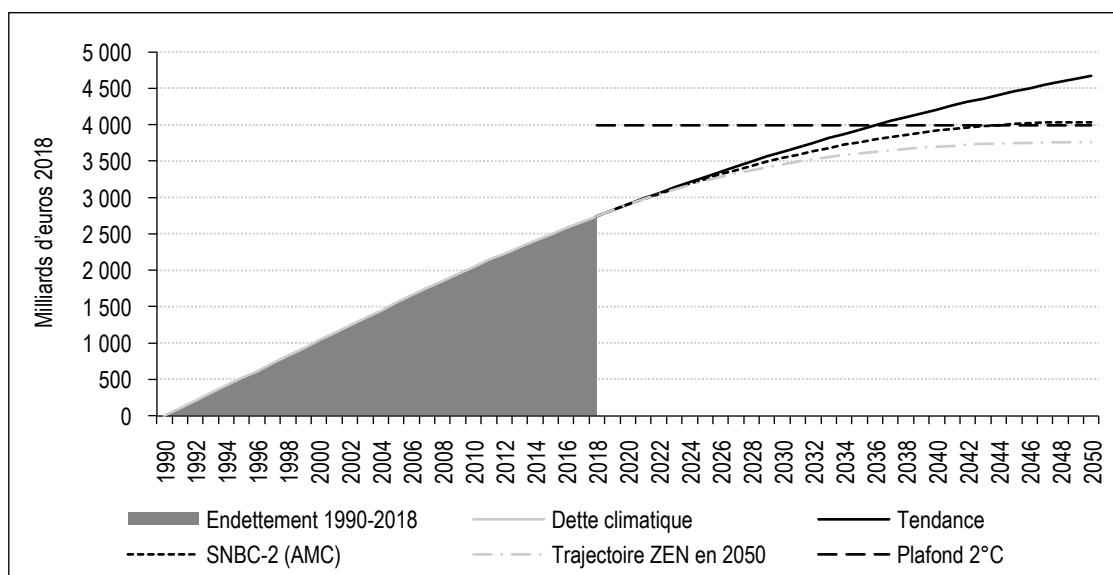
À la question de savoir si le régime actuel d'émissions est compatible avec le respect des engagements nationaux, la réponse est donc clairement non. Nous sommes loin de la trajectoire

cible des émissions de gaz à effet de serre. Si on considère que le non-respect de ces engagements expose de fait à des risques environnementaux majeurs, on peut dire que nous consommons plus de ressources naturelles que la nature n'est capable de le supporter. Hormis quelques climato-septiques, cette appréciation est largement partagée : la notion dite de soutenabilité forte du développement économique, qui exige que chaque génération laisse un capital naturel, physique et humain au moins égal, dans chacune de ces dimensions, à celui dont elle a hérité, n'est pas assurée sur la dimension environnementale.

Est-il utile de compléter ce message par des indicateurs mesurant ce que la littérature qualifie de soutenabilité « faible » ? C'est ce que font les indicateurs agrégeant les évolutions de ces différents types d'actifs, laissant place à l'idée que la baisse d'un type actif pourrait être compensée par la hausse d'un autre. En réalité, ce n'est pas le cas du climat si les dommages sont irréversibles, car alors une dégradation marquée de l'environnement ne pourra pas être compensée par une accumulation de capital physique. 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 (2009). Cela n'empêche pas néanmoins de s'intéresser aussi aux indicateurs de soutenabilité élargie.

Enrichir la comptabilité nationale d'indicateurs de ce type est une problématique ancienne et les propositions pour le faire n'ont pas manqué.

Figure VIII – Endettement climatique depuis 1990, au sens de l'approche rétrospective



Source : CITEPA, calculs des auteurs.

Sur le plan conceptuel, Hicks (1946) introduit la notion de vrai revenu, qu'il définit comme la consommation maximale autorisée sans dégrader le stock de capital, qu'on peut donc interpréter comme un concept de consommation soutenable. C'est la commission Brundtland (1987) qui l'a définitivement mise à l'agenda international en la définissant comme l'impératif de « subvenir aux besoins de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures à en faire de même ». C'est à cette période que Cobb & Daly (1989) introduisent un indicateur du bien-être durable, l'ISEW (*Indicator of Sustainable Economic Welfare*) – aussi appelé PIB vert – intégrant le coût des dégradations de l'environnement ainsi que la question des loisirs et du capital humain. Néanmoins, le PIB vert ne répond pas à la question de la soutenabilité globale. Pour cela, « ce dont nous avons besoin », comme le soulignait le rapport Stiglitz, « c'est d'une évaluation de la distance qui sépare notre situation actuelle des objectifs soutenables [...] en d'autres termes, nous avons besoin d'indicateurs de sur-consommation ou de sous-investissement » (Stiglitz et al., 2009, p. 73), ces deux notions étant entendues dans un sens large.

C'est le cadre d'analyse liant richesse inclusive et épargne nette ajustée qui est plus à même de répondre à cette question (cf. Annexe en ligne C3). Mesurer ainsi la soutenabilité, c'est précisément l'objectif qu'a poursuivi la Banque mondiale depuis les années 2000 en calculant un indicateur d'épargne nette « ajustée » pour la plupart des pays (World Bank, 2006, 2011, 2018). Ces travaux s'appuient sur l'idée Hicksienne qu'une trajectoire soutenable, définie comme une trajectoire où le bien-être monétaire – *comprehensive wealth* – ne décroît jamais, est une trajectoire où l'épargne nette ajustée est toujours positive. Concrètement, l'épargne nette ajustée (ENA) calculée par la Banque mondiale peut s'écrire sous la forme  $EP - CCF + EDU - ENV$  où EP est l'épargne nationale brute, CCF la consommation de capital fixe, EDU la dépense d'éducation<sup>21</sup>, ENV le coût des dommages environnementaux. Cinq facteurs sont pris en compte pour ce dernier : la raréfaction des ressources forestières, pétrolières et minières, le réchauffement climatique et la pollution de l'air.

L'épargne nette ajustée mondiale est évaluée par la Banque mondiale à 10.7 % en 2016, pour une épargne brute de 25.9 %. Les dégradations environnementales ne sont prises en compte qu'à hauteur de -2.6 % du PIB. Malgré la largeur apparente du spectre des dommages pris en compte, les correctifs apportés par la Banque mondiale pour mesurer les dégradations environnementales

sont très faibles au niveau mondial. Ils sont quasiment imperceptibles dans le cas de la France<sup>22</sup>. En particulier, la valorisation financière du réchauffement climatique est très largement sous-estimée, fondée sur un prix social du carbone de seulement 25.5 € la tonne de CO<sub>2</sub><sup>23</sup>. Il s'agit donc de réexaminer ici cette question à la lumière des nouvelles évaluations du prix social du carbone que l'on vient de passer en revue.

#### 4.2. Épargne nette ajustée du coût de réparation climatique

Nous nous concentrons ici sur les questions climatiques. Les données sont issues de la base de données de la Banque mondiale pour ce qui concerne l'épargne nette  $EN_t$  et les émissions de gaz à effet de serre  $E_t$  ; le puits carbone  $\bar{E}$  est calé sur la SNBC-2 au niveau national<sup>24</sup>, et reste constant égal à 10 GtCO<sub>2</sub>eq au niveau mondial. A des fins de simplification, le prix du carbone retenu pour la France et le monde est la valeur moyenne GIEC pour l'objectif de +1.5°C rétropléée en 2019, soit 180 \$ (ou 153 €) la tonne de CO<sub>2</sub>eq (figure IX).

L'épargne nette ajustée apparaît alors négative au niveau mondial. Même si, après avoir atteint un point bas proche de -13 % en 1996, elle s'est redressée depuis notamment en raison de la montée en puissance de l'économie chinoise dont le taux d'épargne est élevé, elle reste en moyenne significativement négative sur les deux dernières décennies. En France, l'épargne nette ajustée est également négative depuis le début des années 1990. À rebours des conclusions de la Banque mondiale<sup>25</sup>, la croissance apparaît donc comme n'étant pas soutenable, même au sens dit

21. L'ENA en revanche ne tient pas compte de la dépréciation du capital éducatif (qui conduit à surestimer l'épargne éducative dans les pays développés) et la qualité de l'éducation.

22. Pour la France, le chiffrage de l'ENA est de 7.1 % : l'épargne brute est de 20.3 %, desquels sont déduits 17.7 % de consommation de capital fixe, soit 2.6 % d'épargne nette ; les dépenses d'éducation jouent en positif pour 4.9 points de PIB, tandis que l'environnement, en négatif, joue pour -0.4 %.

23. Nous exprimerons dans le reste de l'article l'ensemble des « prix » du carbone en euros par tonne de CO<sub>2</sub>. Les prix du carbone se réfèrent parfois aussi à un prix de la tonne de carbone et non pas de CO<sub>2</sub>. Le passage du premier au second se fait par multiplication par 0.275 : la masse atomique du carbone étant 12 et celle de l'oxygène 16, on compte 12/44 tonne de carbone dans une tonne de CO<sub>2</sub>. Un prix de 20 € la tonne de carbone équivaut donc à un prix de 5.5 € la tonne de CO<sub>2</sub>.

24. 40MtCO<sub>2</sub>eq en 2020, en légère progression jusqu'à 80MtCO<sub>2</sub>eq en 2050.

25. La principale raison de l'écart avec les estimations de la Banque mondiale vient d'une différence d'appréciation de la valeur du carbone. La Banque mondiale prend en compte également, contrairement au présent article, l'accumulation de capital humain, valorisé à hauteur des dépenses publiques d'éducation. Ce choix peut sembler optimiste au sens où il semble plus adapté de recourir à des méthodes d'inventaire permanent, réduisant considérablement l'impact sur l'épargne ajustée notamment lorsque l'âge de fin d'étude cesse de progresser comme c'est le cas en France depuis deux décennies. En outre, il est plus que probable que la valorisation positive de l'accumulation de capital humain serait largement plus que contrebalancée par la prise en compte négative de la perte de biodiversité – l'autre préoccupation majeure en matière environnementale – ne modifiant pas le message de non-soutenabilité de la trajectoire économique actuelle.

« faible » du terme c'est à dire en considérant les substitutions entre capital physique et capital naturel. Non seulement, nous utilisons plus de ressources que la nature n'est capable d'en régénérer, mais aussi les richesses que nous laissons ne compensent pas les coûts de réparations des dommages climatiques.

### 4.3. Richesse inclusive, intégrant la dette climatique

À ce concept de flux peut être associé le concept en stock que constitue la richesse inclusive. Elle se définit comme la somme des différentes formes de capital pondérée par le prix implicite de chacun d'entre eux (nous considérons ici le capital physique et le « capital » climatique). Le stock de capital physique est construit par inventaire permanent à partir de 1975, c'est-à-dire en supposant un ratio capital/output de 2.8 en 1975. Ce calcul s'effectue en utilisant les données d'épargne nette de la Banque mondiale.

Le climat est pris en compte à compter de 1990. Il s'agit là d'un choix normatif en cohérence avec celui que nous avons retenu pour l'évaluation de la dette climatique et bien sûr au choix des COP depuis Kyoto d'en faire la référence de l'ensemble des processus qui leur sont associés. On peut considérer aussi qu'à partir de cette date, la lutte contre le réchauffement climatique est devenue un objectif social, et que le fait de

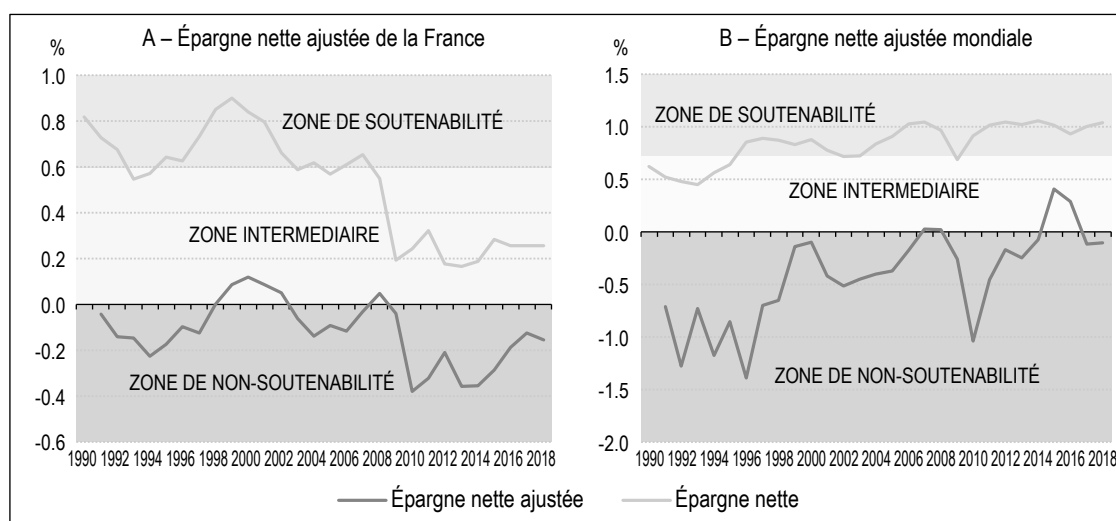
continuer à émettre plus de GES que la planète ne peut en absorber est devenu une dette pour les générations futures<sup>26</sup>.

La richesse inclusive réajustée par habitant s'élève en 2019 environ à 57 500 € en France et 13 175 € au plan mondial, pour une richesse (capital) de respectivement 109 000 € en France et 31 450 € au niveau Monde (figure X). L'écart représente la valeur financière de l'endettement carbone depuis 1990, au sens de l'approche rétrospective. Dans un cas comme dans l'autre, la richesse élargie aux ressources naturelles (ici le climat) est en baisse, plus accentuée en France depuis la crise de 2008 en raison de la baisse de l'épargne brute, la baisse étant plus atténuée au niveau mondial, en raison de l'émergence chinoise.

Par construction, la richesse inclusive est la somme cumulée dans le temps de l'épargne nette ajustée. L'épargne nette ajustée mesure la soutenabilité instantanée, ce qui est intéressant en soi. Mais une année d'épargne nette négative peut être compensée l'année suivante par une année positive ; la richesse inclusive rend compte des évolutions sur la moyenne et longue durée. Dans notre construction, il existe une relation très simple entre richesse inclusive, capital et dette

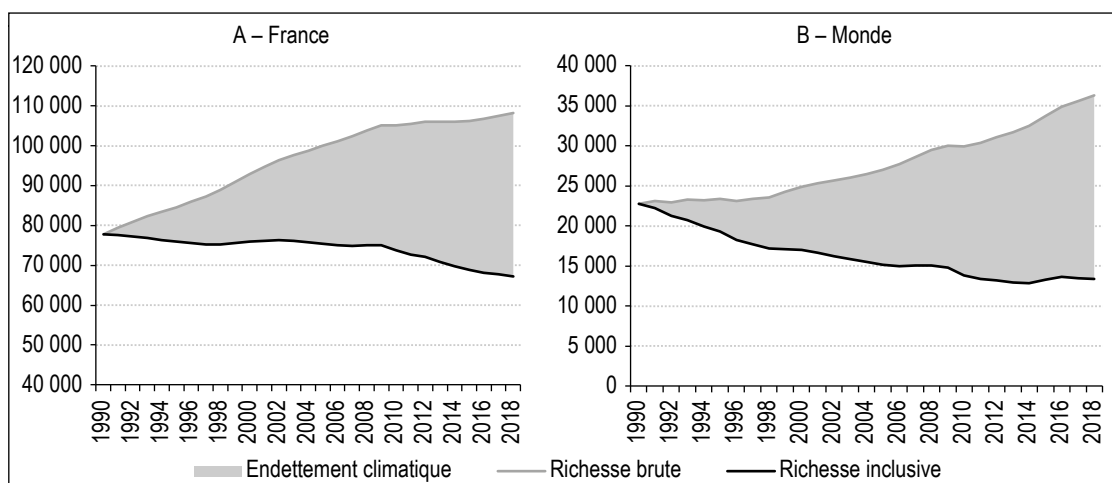
26. Une autre option serait de remonter plus en amont, au moment où les GES ont dépassé la capacité du puits carbone monde, c'est à dire dans les années 1950-1960.

Figure IX – Épargne nette nationale et mondiale ajustée (en % du PIB)



Lecture : les différentes zones s'appliquent à la courbe d'épargne nette ajustée. La zone de soutenabilité correspond en moyenne à une zone d'accroissement simultanée du capital naturel et du capital physique (soutenabilité forte et faible). Dans la zone de non soutenabilité, d'une part le capital naturel baisse, et d'autre part les coûts de réparation sont supérieurs à l'augmentation des revenus (non soutenabilité forte et faible). Dans la zone intermédiaire, l'épargne nette ajustée est positive mais en-deçà de la valeur moyenne de l'épargne nette – cela signifie que le capital naturel est globalement en baisse (soutenabilité faible mais non forte).  
Source : World Bank Data, calculs des auteurs.

Figure X – Richesse par habitant nationale et mondiale intégrant la dette climatique (en euros par habitant)



Source : World Bank Data, calculs des auteurs.

financière climatique (au sens rétrospectif), la première étant simplement la différence entre les deux autres. Ces derniers résultats apportent un éclairage nouveau aux travaux qui concluaient à la soutenabilité de la plupart des pays riches, sur le fondement de ces indicateurs d'épargne nette ajustée et de richesse inclusive. Un prix du carbone correctement calibré aboutit en effet à la conclusion inverse.

\* \*  
\*

Nous nous sommes attachés, dans cet article, à réévaluer la question de la soutenabilité climatique du développement économique, au niveau national pour la France, comme mondial. Sur le plan théorique, des progrès considérables ont été réalisés depuis la fin des années 1990, avec une étape importante autour des travaux de la commission Stiglitz (Stiglitz *et al.*, 2009).

Dans le langage des théories du bien-être et de la soutenabilité, la COP21 et ses déclinaisons continentales et nationales ont donné une valeur sociale à l'action pour le climat. Les sociétés considèrent désormais les émissions de CO<sub>2</sub> au-delà des capacités d'absorption terrestre et océanique comme un coût pour les générations futures. Et ceci donne aux efforts d'atténuation une valeur, la valeur de l'action climat. L'autre facteur essentiel pour juger de la soutenabilité climatique est de nature technico-financière. Traduire en termes financiers des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> nécessite de

connaître le coût des techniques et technologies au regard de leur potentiel de décarbonation de l'économie. Sur ce plan aussi, les grandeurs commencent désormais à être mieux établies, contribuant à fiabiliser les modèles macro-sectoriels comme technico-économiques.

Partant, nous avons proposé un cadre macro-économique permettant d'évaluer les trajectoires optimales de réduction des émissions de GES avec des contraintes en termes d'équité inter-générationnelle et d'évolution des technologies de décarbonation. Ce double mouvement de clarification de l'objectif climat et des connaissances technico-financières nous paraît suffisant pour être en mesure de donner un prix social au carbone raisonnablement fiable. Nous avons montré que cette valeur en France devrait se situer, pour l'objectif de neutralité carbone, autour de 120 à 250 € aujourd'hui, 250 à 500 € en 2030, 500 à 1 000 € en 2040, 1 000 à 2 000 € en 2050. Ces estimations sont globalement conformes, en ordre de grandeur et lorsque l'on analyse les concepts de prix social comparables, aux estimations du GIEC ou à celles établies par la commission Quinet (Quinet, 2019) et les modèles sur lesquels elles s'appuient : elles en constituent la fourchette haute. Pour tenir les engagements climatiques de la France, à savoir la neutralité carbone en 2050 l'effort de dépense climat devrait être porté à 4.5 % du PIB chaque année. L'effort mondial devrait être d'une ampleur comparable (5.1 % du PIB mondial).

Enfin, ces valeurs sociales du carbone rehaussées éclairent d'un jour nouveau l'évaluation de la soutenabilité que l'on qualifie habituellement

de faible, c'est à dire la question – légitimement controversée par ailleurs – de savoir si malgré tout, et donc malgré les dommages environnementaux, le bilan pour les générations futures ne serait pas « positif » compte tenu de l'amélioration continue du niveau de vie moyen. L'épargne nette mondiale, ajustée pour tenir compte des dommages climatiques, est négative sur toute la période considérée. Au cours des trois dernières décennies, le monde se serait appauvri et non enrichi, le coût pour le climat des activités humaines l'aurait emporté sur l'accumulation du capital privé comme public. La richesse inclusive, agrégeant capital naturel et capital physique, est en baisse. Même au sens faible du terme, nous sommes sur une trajectoire de non soutenabilité et ceci en réalité depuis plusieurs décennies, que seul un changement d'échelle des politiques de décarbonation de l'économie est susceptible de corriger.

Nous ne pouvons qu'insister, pour conclure, sur les implications des avancées et clarifications récentes, tant au plan théorique qu'empirique.

La valorisation du prix du carbone est un enjeu majeur pour le pilotage des politiques publiques, et la mise en place d'une comptabilité économique environnementale serait de nature à éclairer le débat public. Mais, une telle comptabilité publique serait également utile pour orienter les choix individuels, de consommation, de production, de déplacement. Une possibilité serait ainsi de fixer par la loi une valeur sociale de l'action pour le climat ou un coût social du carbone<sup>27</sup>, qui préciserait aussi l'usage de cette valeur, pouvant aller de l'étiquetage systématique ou l'intégration dans les normes comptables des entreprises à des mesures plus contraignantes, comme la prise compte dans les marchés publics ou la fixation d'un prix plancher pour l'échange de quotas d'émissions de CO<sub>2</sub>. □

27. Pour mémoire, nous avons distingué le prix social du carbone de la taxe carbone. La taxe carbone n'est en effet que l'un des leviers possibles qui pose par ailleurs de redoutables questions de justice fiscale sans que les effets comportementaux, qui supposeraient des élasticités prix, ne soient établis.

**Lien vers les Annexes en ligne :** [https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/4770128/ES-517-518-519\\_Germain-Lellouch\\_Annexes\\_en\\_ligne.pdf](https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/4770128/ES-517-518-519_Germain-Lellouch_Annexes_en_ligne.pdf)

## BIBLIOGRAPHIE

- Arrow, K.J., Dasgupta, P., Goulder, L., Mumford, K. & Oleson, K. (2012).** Sustainability and the Measurement of Wealth. *Environment and Development Economics*, 17, 317–353. <https://doi.org/10.1017/S1355770X12000137>
- Baptiste-Perrissin, F. & Foussard, A. (2016).** Trajectoires de transition bas carbone au moindre coût. Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer. *Théma du SEEIDD*. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Trajectoires%20de%20transition%20bas%20carbone%20au%20moindre%20co%C3%BBt.pdf>
- Bruntland (1987).** *Our common future*. World Commission on Environment and Development. New-York: Oxford University Press. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- CGDD (2020).** Chiffres clés du Climat : France, Europe et Monde. *Datalab*. [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019\\_0.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019_0.pdf)
- Cobb, J. & Daly, H. (1989).** *For the Common Good: Redirecting the Economy toward Community, the Environment, and a Sustainable Future* (2<sup>nd</sup> updated edition). Boston: Beacon Press.
- Easterlin, R. (1974).** Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some empirical evidence. In: David & Reder (Eds.), *Nations and Households in Economic Growth, Essays in Honor of Moses Abramovitz*, pp. 89–125. New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-205050-3.50008-7>
- GIEC (2015).** Changements climatiques 2014 – Rapport de synthèse. 5<sup>ème</sup> rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf)

- Hicks, J. R. (1946).** *Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory* (2<sup>nd</sup> Edition). Oxford: Clarendon Press.
- Hotelling, H. (1931).** The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137–175. <https://doi.org/10.1086/254195>
- I4CE (2019).** Panorama des financements climat, édition 2018. Institute for Climate Economics. <https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2019/09/I4CE-Panorama2019.pdf>
- Nordhaus, W. D. (1977).** Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide problem. *American Economic Review*, 67, 341–346. <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/carbondioxideproblem.pdf>
- Quinet, A. (2019).** La valeur de l'action pour le climat. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet. Paris: France Stratégie. [https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-laction-pour-le-climat\\_0.pdf](https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-laction-pour-le-climat_0.pdf)
- SCF (2018).** Rapport du Standing Committee on Finance. Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. <https://unfccc.int/fr/process/bodies/constituted-bodies/standing-committee-on-finance-scf/documents>
- Solow, R. (1956).** A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Stiglitz, J. E., Sen, A. K. & Fitoussi, J.-P. (2009).** Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/094000427.pdf>
- Stiglitz, J. E. & Stern, N. (Dir.) (2017).** Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. [https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53deccfb4c/t/59244eed17bffc0ac256cf16/1495551740633/CarbonPricing\\_Final\\_May29.pdf](https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53deccfb4c/t/59244eed17bffc0ac256cf16/1495551740633/CarbonPricing_Final_May29.pdf)
- UNU-IHDP. (2012).** *Inclusive wealth report 2012: measuring progress toward sustainability*. Cambridge University Press.
- World Bank (2006).** *Where is the Wealth of Nations? Measuring Capital for the 21st Century*. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/287171468323724180/pdf/348550REVISED0101Official0use00NLY1.pdf>
- World Bank (2011).** *The Changing Wealth of Nations? Measuring Sustainable Development in the New Millennium*. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/630181468339656734/pdf/588470PUB0Weal101public10BOX353816B.pdf>
- World Bank (2018).** *The Changing Wealth of Nations: Building a Sustainable Future*. Washington DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29001>
-