



GOVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

RAPPORT THÉMATIQUE
Février 2022

PROSPECTIVE 2040-2060 DES TRANSPORTS ET DES MOBILITÉS

20 ans pour réussir collectivement
les déplacements de demain

Risques et incertitudes

Travaux coordonnés par :
Michel Massoni
Alain Sauvant

Sommaire

Résumé.....	5
Introduction générale et présentation du rapport et de ses annexes.....	6
Avant-propos	7
1 Une nouvelle approche prospective est nécessaire, autour des trois déterminants : décarbonation, numérisation et sobriété.....	8
1.1 Une analyse prospective orientée vers l'aide à la décision	8
1.2 Les scénarios envisagés.....	8
1.3 L'urgence climatique surplombe les réflexions. Décarboner presque totalement les transports en une génération ne se fera pas au dernier moment	10
1.3.1 Le constat : Le secteur des transports a augmenté ses émissions directes de plus de 10 % par depuis 1990, il est question ici qu'il les divise par dix d'ici 2050.....	10
1.4 Le défi : Partager collectivement les enjeux du climat, l'urgence d'agir et donner de la visibilité à chacun sur l'avenir.....	14
2 La prise en compte des risques et des incertitudes.....	16
2.1 Le problème de l'évaluation des mesures à prendre.....	16
2.2 La question des valeurs d'option	19
2.3 Les incidences de long terme des projets de lutte contre le changement climatique .	19
2.4 Les incertitudes sur les conséquences du dérèglement climatique	20
2.5 L'analyse des incertitudes dans la prospective des transports.....	21
2.5.1 Une première approche dans le cadre des présents travaux	21
2.5.2 La méthode retenue	21
Conclusion.....	26
Annexes.....	27
Annexe 1 : Composition du groupe de travail « Risques et incertitudes ».....	28
Annexe 2 : Typologie des incertitudes et exemples de mise en œuvre de la méthode des options réelles.....	29

Quelles incertitudes majeures pèsent sur le système des mobilités ?.....	29
Annexe 3 : La décision publique en présence de l'incertitude climatique	37
Annexe 4 : Tentative de mise en œuvre des options réelles	46
Coût social du carbone.....	46
Le problème du risque à examiner	51
Première tentative de mise en œuvre de la théorie des options réelles.....	54
Fiches de calculs des valeurs d'option.....	58
Proposition d'affinement des arbres de choix.....	63
Annexe 5 : Première évaluation par la méthode de Monte-Carlo d'une politique flexible de gestion des incertitudes liées au dérèglement climatique dans les mobilités	65
Évaluation des coûts des dommages et des coûts d'évitement pour chaque décennie dans les différents scénarios prospectifs	66
Les horizons temporels d'évaluation	70
Les principaux résultats de l'analyse par scénario statique	70
La politique flexible.....	73
Discussion	76
Comment estimer les coûts des politiques de motorisation et de sobriété.....	79
Les coûts socio-économiques de diverses politiques publiques.....	79
Annexe 6 : Glossaire des sigles et acronymes	81

Résumé

Le présent rapport présente les travaux du groupe de travail sur les incertitudes et les risques, qui comprennent des revues de littérature, des tentatives de caractérisation de ces risques et incertitudes dans le domaine spécifique des mobilités et des transports, avec un focus plus particulier encore sur la mobilité des personnes, et enfin des tentatives d'emploi de diverses méthodes pour réaliser une quantification et une analyse des arbres de décision en avenir incertain.

Il s'agit ici essentiellement, avec des outils très simples qui ont supposé des simplifications drastiques, évidemment contestables, d'attirer l'attention sur l'intérêt de développer des démarches structurées et approfondies.

Introduction générale et présentation du rapport et de ses annexes

Le rapport du groupe « risques et incertitudes » présente quelques premiers éclairages sur les méthodes utilisables pour éclairer la décision à long terme dans le domaine des mobilités.

Il se compose d'une proposition de synthèse qui analyse la nature des principales incertitudes ainsi qu'une présentation d'ensemble des approches utilisables.

Elle est complétée par plusieurs annexes :

- une annexe tente un premier inventaire des incertitudes touchant les mobilités, que ce soit sur le plan technologique, sociétal ou environnemental ; et esquisse une présentation de l'approche basée sur les options réelles, à savoir la valeur économique de la possibilité mais non l'obligation de prendre une décision le moment venu en fonction notamment des circonstances du moment ; elle est appliquée notamment au cas d'une décision de lancement d'un programme d'ampleur de recherche et développement technologique, ainsi qu'au cas de lancement d'une politique de sobriété des mobilités en cas de survenance d'informations nouvelles négatives relatives à la gravité du dérèglement climatique ;
- une autre annexe explore les avantages et inconvénients comparatifs de deux méthodes de décision face aux incertitudes environnementales, l'une (« minimax ») très protectrice par rapport au risque environnemental mais qui prend en compte l'intégralité du champ des possibles, l'autre (« infogap ») un peu moins protectrice, mais présentant dans la plupart des cas des coûts d'évitement plus mesurés, dans la mesure où le champ de la décision possible est restreint à des situations jugées *a priori* présentant une probabilité minimale d'occurrence ;
- une troisième tente une comparaison des coûts d'évitement et des dommages dans le secteur des mobilités terrestres de voyageurs dans divers scénarios ; sur cette base, elle explore, sur la base d'un modèle de type Monte-Carlo, la valeur apportée par une politique de décision dite flexible, dépendant des informations acquises progressivement dans le futur par rapport à une politique de décision non flexible, définie *a priori* en début de période en fonction des informations disponibles en amont ; elle montre l'avantage des politiques flexibles, sauf dans le cas où la présence d'incertitudes radicales pourrait amener à des issues très négatives d'une politique flexible en cas de survenance très rapide de conséquences très négatives ne pouvant être anticipées en amont, ou survenant plus rapidement que le temps de réaction compatible avec l'inertie technique et sociétale du système considéré.

Ces premiers éléments sont inévitablement très exploratoires et mériteraient des explorations complémentaires.

Avant-propos

Pour contribuer à l'effort collectif indispensable, dans son Plan Climat de juillet 2017, la France s'est fixé l'objectif « zéro émissions nettes » (ZEN) de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, les émissions brutes résiduelles ayant vocation à être absorbées par les puits de carbone que sont notamment les forêts, les prairies et éventuellement à plus long terme les dispositifs technologiques de séquestration du carbone.

Pour sélectionner les actions pertinentes, une méthode rationnelle consiste à leur donner une valeur socio-économique, c'est-à-dire une valeur du point de vue de la collectivité. La valeur de l'action pour le climat représente précisément la valeur monétaire que la collectivité attribue aux actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO₂ (CO₂e). Cette évaluation doit porter sur l'ensemble des actions possibles, pour fixer les bonnes priorités, encourager les actions utiles et les séquencer dans le temps.

1 Une nouvelle approche prospective est nécessaire, autour des trois déterminants : décarbonation, numérisation et sobriété

Jusqu'à présent, réaliser un exercice de prospective des transports, ou des mobilités, consistait généralement à prendre en compte divers scénarios de grands cadrages internationaux (évolution des échanges économiques) et macroéconomiques nationaux (évolutions de PIB) plus ou moins raffinés pour en déduire les besoins de déplacements des biens et de personnes qui en résultaient, à analyser les mesures vertueuses susceptibles de les accompagner (internalisation des externalités) et à décrire les conséquences qui en résultaient (notamment les besoins de services et d'infrastructures).

Dans le contexte actuel, ce n'est plus ainsi qu'il faut s'y prendre. Les scénarios présentés ci-dessous sont une tentative de concilier la diversité des futurs possibles et pour chacun de ceux-ci des quantifications utiles pour les illustrer, dans lesquelles on retrouve les moteurs et déterminants classiques de ces calculs.

1.1 Une analyse prospective orientée vers l'aide à la décision

La prospective telle qu'elle a été ici conçue, reste sectorielle et cantonnée au champ des mobilités. Elle se heurte ainsi au caractère nécessairement partiel de ses analyses : il n'était pas ici question de scénarios de rupture tels que guerres, invasions, pandémies non maîtrisées, ruines globales... Non que ces hypothèses seraient trop improbables pour être prises en compte, mais leur description ne renseignerait pas sur les stratégies d'action publique à conduire dans le secteur des mobilités. Les équipes de travail et les parties prenantes consultées dans cet exercice n'auraient pas été armées pour les examiner de façon pertinente. Tout en élargissant fortement le champ des possibles examinés, ceux-ci restent donc ceux qui répondent à des évolutions du monde aujourd'hui connu et non pas à son bouleversement violent.

Tous les aspects de la mobilité n'ont pas été examinés avec le même détail. L'angle de la réflexion est de chercher les questions de choix qui se posent aujourd'hui aux politiques publiques et de les éclairer en poussant sur de longues durées les dynamiques envisagées. Pour cela les émissions de gaz à effets de serre ont été au cœur du travail car elles posent une question surplombante : **est-ce qu'à l'avenir nos mobilités évolueront plutôt librement au gré des progrès technologiques et des évolutions spontanées des modes de vie ou seront-elles limitées par de fortes contraintes économiques ou réglementaires ?**

1.2 Les scénarios envisagés

Les scénarios prospectifs construits par une communauté d'experts animés par le CGEDD et France Stratégie illustrent et documentent de façon détaillée une nouvelle approche prospective de ces questions, dont les déterminants principaux sont les incertitudes technologiques (décarbonation et numérisation) et comportementales (sobriété).

L'analyse a porté sur cinq scénarios contrastés de *forecasting* qui ne prennent pas l'objectif de neutralité carbone en empreinte à terme comme une donnée d'entrée :

- Le scénario dit « ambition de base » prend en compte toutes les mesures prises ou

envisagées aujourd'hui et les complète par des progrès technologiques significatifs essentiellement fondés sur les technologies matures et des comportements plutôt parcimonieux amplifiant les pratiques de télétravail, de covoiturage, etc... Ce n'est donc pas un scénario « *business as usual* », mais un scénario qui extrapole l'accroissement des efforts qui ont commencé.

- Le scénario dit de « poussée de sobriété » où les progrès technologiques restent similaires à ceux du scénario « ambition de base » et où des efforts supplémentaires de sobriété sont consentis.
- Le scénario dit « poussée de technologie » où les ambitions technologiques sont très fortes, et qui suppose que des technologies qui sont encore au stade de la recherche parviennent à mûrir et à se déployer sans contrainte particulière de ressources. La sobriété y est proche de celle du scénario « ambition de base ».
- Le scénario dit « hypercontraint » où, à défaut d'amélioration technologique probante, les contraintes d'usages sont fortement renforcées, pour tenter de s'écarter le moins possible de l'objectif d'émission, sans toutefois y parvenir.
- Le scénario dit du « pire climatique » allie de faibles progrès technologiques et des comportements tournés vers la consommation individuelle.

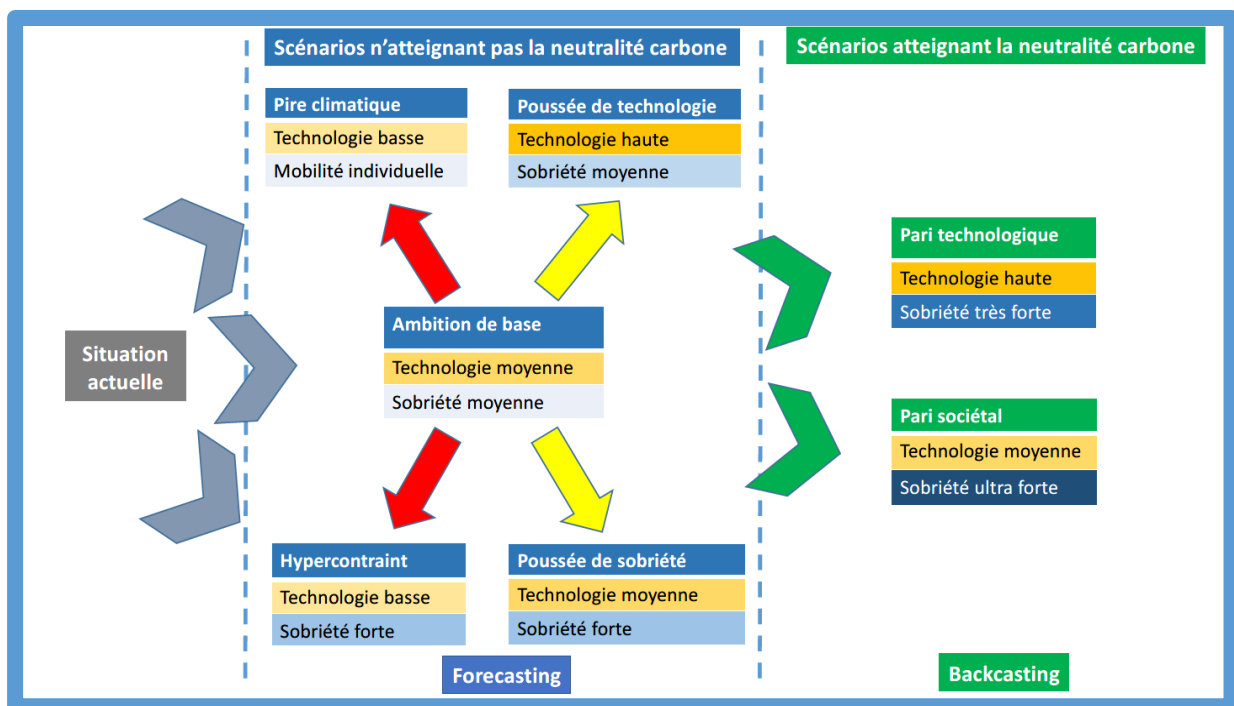


Figure 1 : Les scénarios de l'exercice de prospective des mobilités 2040-2060
Source : Prospective des transports et de la mobilité - CGEDD-France Stratégie

Aucune des trajectoires précédentes n'atteint la neutralité carbone en analyse en cycle de vie (ACV) : deux scénarios de neutralité carbone ont donc été envisagés dans une démarche dite de *backcasting*, consistant à partir de l'objectif à atteindre, en l'occurrence la neutralité de l'empreinte carbone « complète » du secteur à 2060, à chercher les mesures à envisager pour y parvenir. Cette démarche a consisté à identifier des mesures supplémentaires de sobriété par

rapport aux deux scénarios de *forecasting* intitulés « poussée de technologie » et « poussée de sobriété ». Ces deux scénarios sont en réalité très contrastés :

- Le scénario dit du « pari technologique » est optimiste quant aux progrès technologiques (identique sur ce point au scénario « poussée de technologie »). Pour pouvoir atteindre la neutralité carbone, il suppose de plus un renforcement très significatif des efforts de sobriété allant légèrement au-delà du scénario « poussée de sobriété ».
- Le scénario dit du « pari sociétal » s'appuie sur des progrès technologiques significatifs mais allant un peu moins loin, ou des limites de ressources, (comme le scénario « ambition de base »), mais demande pour parvenir à la neutralité carbone de recourir à des efforts de sobriété nettement plus importants encore que le scénario « poussée de sobriété ».

1.3 L'urgence climatique surplombe les réflexions. Décarboner presque totalement les transports en une génération ne se fera pas au dernier moment

La dimension surplombante est celle de l'empreinte écologique de ces activités, et notamment l'empreinte carbone, dont le poids significatif ne peut être traité comme une simple externalité à maîtriser : cette décarbonation des transports doit être quasi totale en l'espace d'une génération pour répondre aux objectifs climatiques¹. Les mutations nécessaires à la décarbonation de ces déplacements de biens et de personnes sont urgentes, mais à des degrés de maturité technologique et d'accessibilité économique très divers et constituent une incertitude majeure des projections à 2040 et 2060.

1.3.1 Le constat : Le secteur des transports a augmenté ses émissions directes de plus de 10 % par depuis 1990, il est question ici qu'il les divise par dix d'ici 2050

1.3.1.1 De très fortes réductions sont nécessaires pour atteindre la neutralité carbone

L'article 4 de l'Accord de Paris prévoit l'atteinte de la neutralité carbone à l'échelle mondiale dans la seconde partie de ce siècle défini comme « **un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre**, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ». La France a adopté en 2019 ce même objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 en précisant dans la loi relative à l'énergie et au climat² que cet objectif conduit à diviser les émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six par rapport à la situation de 2019. Le présent exercice de prospective relatif

¹ À titre d'exemple, le point 9 de la stratégie européenne de mobilité durable et intelligente proposée par la Commission européenne en décembre 2020 est établi avec l'objectif de réduire d'un facteur dix les émissions directes (à l'échappement) sur un périmètre qui comprend les transports terrestres et les transports maritime et aérien intra-européens, alors que ces mêmes émissions ont augmenté de 10 % dans les vingt dernières années.

² Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039355955>

au secteur des transports repose sur une appréciation plus large, et donc plus exigeante, de la neutralité que celle de ces textes :

- sont également prises en compte ici les émissions de gaz à effet de serre en amont de la production des carburants (environ 20 % des émissions directes des carburants produits) ainsi que celles des transports maritimes et aériens internationaux au départ de la France (qui ajoutent 17 % aux émissions du transport en France, et 20 % quand on comptabilise également les soutes achetées hors de France³): dans la comptabilisation actuelle de l'ONU et donc dans la loi française, ces transports ne relèvent pas des États, mais de l'OACI pour l'aérien et de l'OMI pour le maritime ; on se place donc ici non pas du point de vue de la responsabilité institutionnelle au regard des engagements pris, mais de la réalité de la contribution du secteur des transports aux émissions ;
- l'exercice utilise une comptabilisation en empreinte environnementale et s'appuie sur des analyses de cycle de vie. Il prend donc en compte les émissions liées à la fabrication des produits finis et des biens intermédiaires fabriqués en France et importés (en retirant le total correspondant aux exports)⁴.



Illustration 1 : Biocarburant, usine de production d'éthanol - Crédit : Laurent Mignaux/Terra

³ Un certain nombre de navires au départ de la France achètent leurs carburants à moindre coût dans des ports étrangers : le détail du calcul figure dans le rapport thématique transport maritime et ports.

⁴ Le rapport de la CCTN (p123) de 2017 estime la fabrication des véhicules à 0,4 tCO₂ par habitant. Par ailleurs, les infrastructures routières représenteraient 7 % des empreintes des véhicules, auxquelles il faudrait ajouter celles des infrastructures de chemins de fer et TCU lourds.

- le présent exercice évoque également les effets sur le climat des émissions, notamment de l'aviation, d'autres GES que le CO₂, à savoir les émissions de NOx et de vapeur d'eau (qui dans une vision pessimiste pourrait ajouter un effet de court terme non négligeable comportant néanmoins une forte incertitude⁵).

1.3.1.2 Pourquoi être sorti ici du cadre des stratégies et modes de comptabilité officiels ? Le raisonnement en empreinte carbone s'impose

Un raisonnement sur les seules émissions à l'usage peut, au moins en théorie, conduire à des choix technologiques qui auraient des effets collatéraux qui contrebalancent les avantages attendus en renforçant les émissions de l'amont et de l'aval du cycle de vie. Un raisonnement en empreinte traite toutes les composantes liées à ces choix et apporte la cohérence d'ensemble souhaitable.

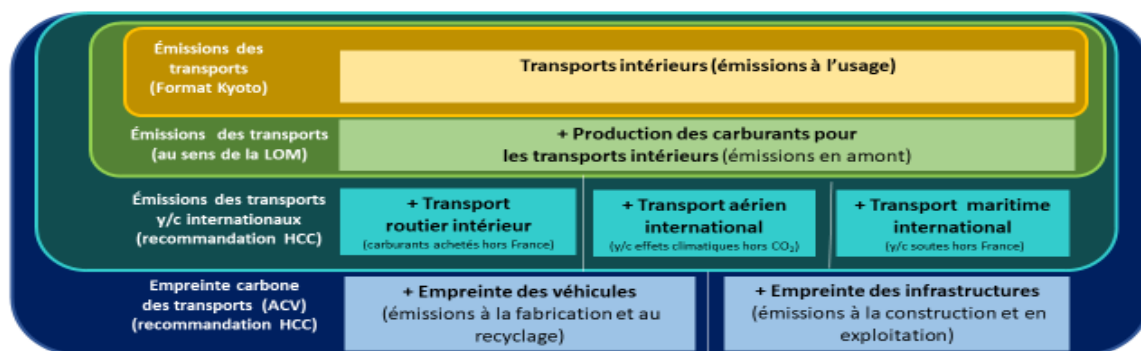


Figure 2 : Empreinte carbone complète

Source: Prospective des transports et de la mobilité 2040 2060 - CGEDD, France stratégie

En pratique (voir les développements du rapport transversal et le texte en annexe sur ce sujet) ces deux approches ne conduisent généralement pas à des stratégies vraiment différentes, au moins à court terme: l'électrification des motorisations à partir d'électricité décarbonée (ou l'utilisation de carburants neutres en carbone) est un chemin indispensable, qui est bien induit par la neutralité des émissions à l'usage, mais ne suffira pas *in fine* pour la neutralité en empreinte et doit être complétée par une sobriété plus forte.

⁵ Un facteur radiatif équivalent pour la vapeur d'eau de l'ordre de deux fois les émissions aériennes de CO₂ est utilisé, sur la base des travaux de Bock et al. *Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic*, Atmos. Chem. Phys., 19, 8163–8174, 2019, <https://acp.copernicus.org/articles/19/8163/2019/>. Ceci amène à ajouter aux émissions actuelles un chiffre de 45 MtCO₂ (chiffre qui correspond essentiellement à un effet de court terme renouvelé en permanence, qui peut donc disparaître très rapidement si une nouvelle technologie apparaît).

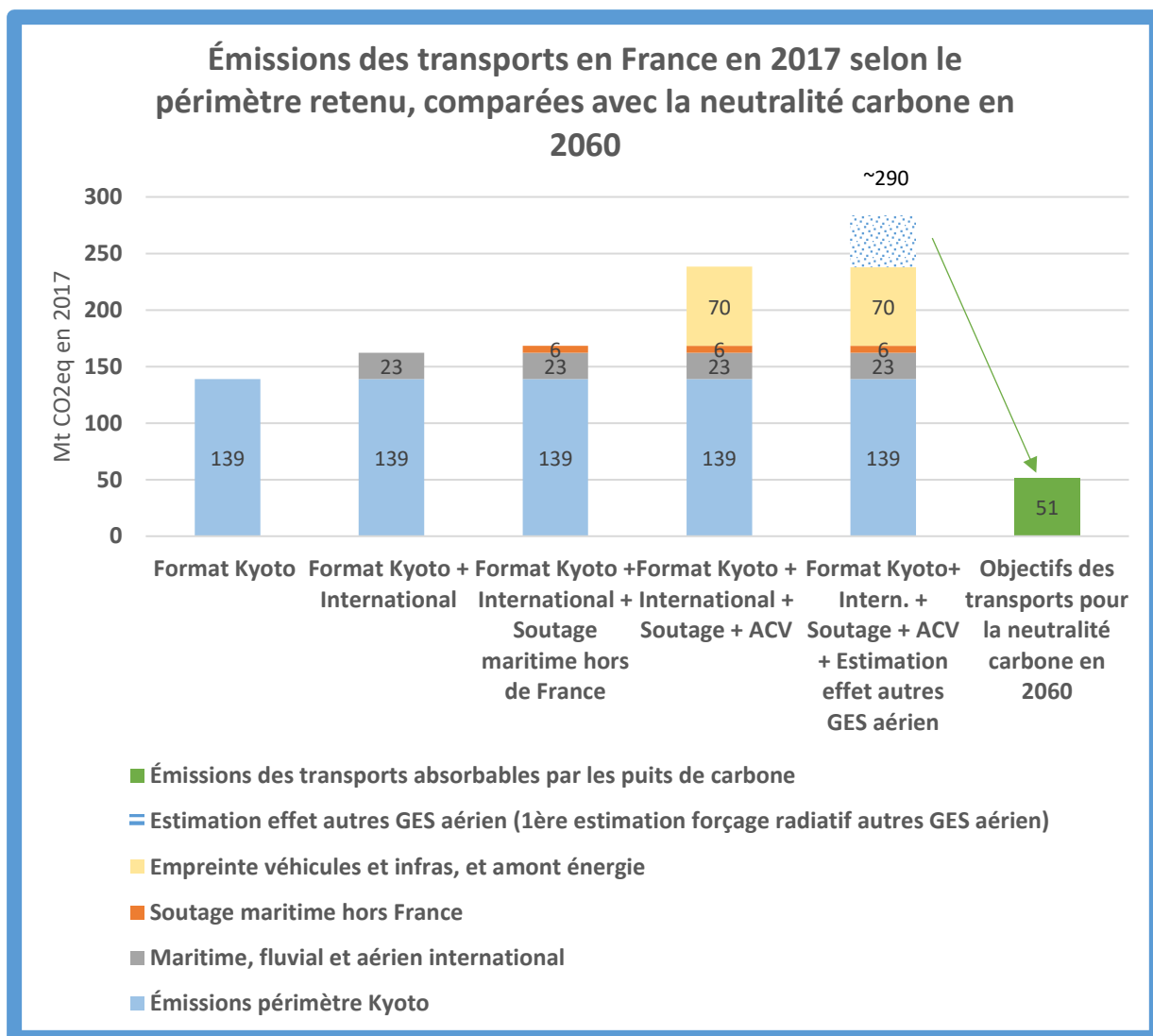


Figure 3 : Émissions de GES du transport : i) au format Kyoto, ii) en incluant l'international; iii) le soutage maritime hors de France, iv) les émissions liées à l'amont pétrolier et à l'empreinte des véhicules (format ACV), v) les effets de court terme de l'aérien

Source: Prospective des transports et de la mobilité 2040 2060 - CGEDD, France stratégie

1.3.1.3 In fine, quel facteur de réduction des émissions ?

Sur la base de ces éléments, le présent exercice retient à titre de simplification que l'atteinte de la neutralité carbone (au sens défini ci-dessus de l'empreinte carbone du secteur) correspond à un facteur global de l'ordre de 6 de réduction des émissions qui est formée de :

- réductions plus importantes liées aux émissions en circulation des transports terrestres (environ 8) ;
- réductions moyennes liées à l'empreinte des matériaux fabriqués en France et à l'étranger : le présent exercice a été prudent sur cette réduction en ne considérant

qu'un facteur de réduction voisin selon les cas de 30 % ;

- réductions plus difficiles à obtenir notamment dans l'aérien (environ 4 en incluant l'aérien international et les autres gaz à effet de serre), voire le maritime, international.

Emissions GES 2040 2060 terre air mer				
Scénarios	1990	2017	2040	2060
Scénarios de forecasting				
Pire climatique	244	296	362	470
Ambition de base	244	296	213	122
Poussée de technologie	244	296	154	61
Poussée de sobriété	244	296	200	105
Hypercontraint	244	296	254	207
Scénarios de backcasting				
Pari technologique	244	296	142	51
Pari sociétal	244	296	159	51

*Tableau 1 : Émissions de GES en ACV tous modes à 2040 et 2060 en MtCO₂e.
Source: Prospective des transports et de la mobilité 2040 2060 - CGEDD, France stratégie*

1.4 Le défi : Partager collectivement les enjeux du climat, l'urgence d'agir et donner de la visibilité à chacun sur l'avenir

Selon l'expression de l'Organisation mondiale de la météorologie, les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et la chaleur qu'elles induisent ont désormais « propulsé la planète sur un terrain inconnu ».

La transition écologique et énergétique ne pourra être menée à bien que si une majorité de Français en partage les enjeux, les problématiques et l'urgence d'agir. À défaut d'un illusoire consensus sur les actions retenues, on pourrait rechercher pour fluidifier et enrichir le débat public une compréhension commune des termes du débat, aussi bien sur les causes et les conséquences du changement climatique, que sur les moyens et les outils réglementaires et économiques possibles (taxe carbone, marché carbone...) pour le prévenir.

Le développement de l'internet qui nous permet d'accéder instantanément à une grande partie des connaissances scientifiques de l'humanité divise plutôt que rassemble : chacun finit en effet par trouver ses informations dans ses propres réseaux sociaux conduisant ainsi à des cultures très éloignées les unes des autres. Trois pistes pourraient nous guider dans ce partage :

- **la mise à disposition des décideurs et du public des connaissances et des débats scientifiques** : c'est ce que font le GIEC et l'IPBES tous les six ou sept ans avec leurs rapports scientifiques. Convenons cependant que le résumé pour décideurs du GIEC n'est pas d'une lecture aisée et demande quelques explications. C'est ce que font également parfois les économistes, avec plus de difficultés, compte tenu des positions contrastées inhérentes à cette discipline : le rapport rédigé sous la

présidence d'Olivier Blanchard et de Jean Tirole sur les grands défis économiques en est un bon exemple ;

- **la création de lieux de débats, nationaux ou locaux, *ad hoc***: Au-delà de la démocratie représentative, des débats *ad hoc* permettent d'éclairer la décision : le Grenelle de l'environnement a ainsi conduit à une première loi adoptée quasiment à l'unanimité. La crise des gilets jaunes montre que le partage des enjeux du climat, de la biodiversité et de l'urgence de l'action est aujourd'hui insuffisant : la mise en place d'une assemblée, regroupant notamment les élus et les collectivités locales, les experts publics, les ONG, les syndicats de salariés, les organisations patronales, la convocation de la science, le dialogue entre l'exécutif et cette assemblée est une méthode possible. Il y en a certainement d'autres, y compris en local ;
- **le recours à des autorités indépendantes chargées d'évaluer la politique du gouvernement** : c'est le rôle du Haut conseil pour le climat et du *Climate change Committee* au Royaume-Uni (qui a inspiré la création du HCC).

2 La prise en compte des risques et des incertitudes

2.1 Le problème de l'évaluation des mesures à prendre

L'établissement d'une valeur de l'action pour le climat devrait idéalement s'appuyer sur une analyse coûts-avantages, qui consiste à identifier la valeur du carbone qui égalise le coût marginal des dommages liés à l'émission d'une tonne de CO₂ équivalent et le coût marginal de la réduction de ces mêmes dommages. Cette méthode dont le principe repose sur les travaux historiques d'Arthur Pigou⁶ sur les externalités, a été appliquée dès les premiers travaux sur le climat de William Nordhaus⁷, puis reprise notamment dans le rapport Stern (2006)⁸.

Pour pouvoir la mettre en œuvre, il faut calculer le dommage subi par l'ensemble de l'humanité du fait de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, indépendamment du pays à l'origine de l'émission et de la localisation des dommages. En pratique, ce calcul est très complexe et ses résultats comportent de nombreuses incertitudes.

Une méthode moins ambitieuse consiste à identifier la valeur d'une tonne CO₂ équivalent évitée à prendre en compte dans les décisions de l'ensemble des acteurs économiques pour que la France atteigne la neutralité carbone à l'horizon 2050. Il s'agit d'une méthode dite d'analyse coûts-efficacité, plus simple que l'analyse coûts-avantage. Cette deuxième méthode permet de réduire l'influence des incertitudes sur l'évaluation des dommages, en se fondant sur un objectif reflétant les préférences collectives. La valeur tutélaire ainsi définie représente la valeur pour la société des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre permettant d'atteindre l'objectif de neutralité.



Illustration 2 : Craquelures d'un lit de rivière à sec - Crédit : Laurent Mignaux/Terra

⁶ <https://www.economie.gouv.fr/facileco/arthur-pigou>

⁷ <https://williamnordhaus.com/>

⁸ Lord Nicholas Stern, « *The Economics of Climate Change* », Cambridge University Press, 2006

L'externalité climatique est une externalité de stock, liée au niveau de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est pourquoi la prise en compte de cette externalité s'exprime traditionnellement en budget carbone, c'est-à-dire en plafond d'émissions de CO_{2e} cumulées dans le temps à ne pas dépasser pour contenir l'élévation des températures.

L'épuisement rapide des budgets carbone mondiaux conduit aujourd'hui à compléter les objectifs de stock, c'est à dire la gestion prudente d'un budget carbone pluriannuel, par un objectif en flux consistant en l'atteinte à partir d'une certaine date d'émissions nettes de gaz à effet de serre liées aux activités humaines égales à zéro. Cet objectif est la référence de l'Accord de Paris de 2015 et du rapport spécial du GIEC sur la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C publié en octobre 2018.

La France se fixe un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, sans attendre la seconde moitié du XXI^{ème} siècle. Cet horizon est en ligne avec l'Accord de Paris qui invite les pays développés à engager des efforts rapides. Il intègre le besoin d'action précoce pour réduire la dépendance aux hydrocarbures et ne pas être pris au dépourvu en cas de mauvaise nouvelle. L'objectif pour 2050 doit évidemment être compris comme un objectif qu'il faut tenir dans la durée, tout au long de la seconde moitié du siècle, ce qui suppose un découplage durable entre émissions de gaz à effet de serre et activités humaines.

L'ambition française est de réussir la transition vers la neutralité carbone sans peser sur la croissance. La démarche retenue répond ainsi à deux exigences : parvenir à décarboner l'économie en réduisant les émissions de gaz à effet de serre par unité de PIB ; investir pour ce faire dans l'efficacité énergétique et les technologies décarbonées.

La gestion rationnelle d'un « budget carbone » requiert d'adopter une trajectoire d'émissions et de valeur tutélaire du carbone permettant de respecter le plafond d'émissions en minimisant le coût des transitions économiques et sociales.

Les travaux de modélisation montrent qu'il existe des marges importantes de décarbonation à des coûts modérés, par exemple, l'optimisation des systèmes de transports publics, l'électrification de certains usages (motorisation sous réserve d'utiliser une énergie primaire décarbonée).

Décarboner en profondeur l'économie implique des changements de grande ampleur, dans un contexte où la structure des systèmes énergétiques n'évolue que lentement et où les émissions de gaz à effet de serre restent difficilement compressibles en deçà de certains seuils pour certains usages.

Des travaux antérieurs, par exemple ceux réalisés pour le rapport d'Alain Quinet de février 2019⁹ ont montré que :

- l'atteinte de l'objectif « zéro émissions nettes » passera à la fois par des économies d'énergie et par une décarbonation de l'énergie utilisée ;
- la décarbonation sera progressive et reposera pour une large part sur des investissements destinés à « verdir » le capital existant (par exemple les véhicules dans le cas des transports) ou à constituer de nouvelles infrastructures (dans les transports les réseaux de borne de recharge électrique, les réseaux de transports

⁹ La valeur de l'action pour le climat - Rapport de la commission présidée par Alain Quinet (France Stratégie-Février 2019)

collectifs).



Illustration 3 : Borne de recharge de véhicule électrique - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

Ils ont aussi fait observer que vouloir tout faire en même temps, sans tenir compte des coûts et des bénéfices en terme d'efficacité d'abattement, comporte des risques qui peuvent amoindrir l'efficacité du processus de décarbonation du secteur des transports mais aussi plus généralement de l'ensemble de l'économie :

- déployer prématurément une technologie qui se révélera être une impasse entraînerait des coûts irrécupérables ;
- évincer d'autres priorités publiques y compris celles entraînant des gains plus élevés en termes de bilan carbone ;
- peser exagérément sur le pouvoir d'achat des ménages et donc sur l'acceptabilité sociale des efforts nécessaires en imposant des coûts de mise en conformité plus élevés qu'il ne le faudrait.

Les gisements de réduction à bas coût des émissions de gaz à effet de serre doivent être mobilisés en priorité, avant que ne soient lancées les actions plus coûteuses. C'est l'intérêt d'une trajectoire pluriannuelle de valeur tutélaire du carbone de guider le déclenchement en temps utile – ni trop tôt, ni trop tard – des actions efficaces, en tenant compte des délais de réalisation des investissements et des baisses de coûts liés aux effets d'apprentissage.

Une action sectorielle de décarbonation, quelle que soit sa forme, peut être considérée comme un investissement, car elle nécessite généralement une dépense initiale qui permet ensuite de réduire durablement la quantité de CO₂e émise. Cet investissement peut être mesuré en euros à la tonne de CO₂e évitée, ce que les spécialistes appellent le coût d'abattement. Ce coût doit être comparé à la trajectoire de valeur tutélaire du carbone pour évaluer si l'action de décarbonation envisagée est pertinente du point de vue de la collectivité. Ainsi, toutes les actions de décarbonation dont le coût d'abattement est inférieur à la moyenne de la valeur tutélaire du carbone actualisée sur la durée de l'action peuvent être considérées comme pertinentes pour la collectivité. Les autres actions entraînent, toutes choses égales par ailleurs des surcoûts par rapport à un chemin efficace.

Elles doivent donc être soit différées, soient même rejetées si leur coût d'abattement est supérieur à la valeur tutélaire actualisée du carbone.

2.2 La question des valeurs d'option

La valeur « assurantielle » des grands projets ou politiques structurants doit être monétarisée. En effet, il convient d'éviter que des projets utiles à la décarbonation ne se fassent pas au seul motif que la convergence vers la neutralité carbone pourrait être atteinte sans leur mise en œuvre. Cette monétarisation est particulièrement utile pour les projets ou politiques structurants qui permettent d'offrir aux acteurs publics et privés des solutions alternatives à l'usage des énergies carbonées.

La lutte contre le changement climatique appelle des actions précoces pour prévenir le risque de dommages graves et irréversibles. Il est également pertinent, s'agissant de projets à durée de vie potentiellement très longue, de garder une certaine flexibilité. Il y a en effet un risque à qualifier « d'indispensables » les solutions déjà connues, de les déployer massivement sur les bases d'analyses socioéconomiques à trop court terme ou mécaniques et de décourager l'innovation qui permettrait de faire émerger des solutions potentiellement plus efficaces, créant ainsi un verrouillage technologique.

Cette flexibilité peut prendre deux formes :

- favoriser la réalisation précoce de projets dont l'utilisation est flexible. Par exemple, un réseau de chaleur peut être alimenté par diverses sources de chaleur : il n'est donc pas nécessaire de savoir quelle source de chaleur renouvelable sera privilégiée dans le futur pour être certain de l'intérêt de ce type d'infrastructures ;
- séquencer dans le temps certaines décisions pour mieux tenir compte des nouvelles informations. Par exemple, avant de déployer massivement un réseau de transport donné (autoroute électrique, réseau de bornes de recharge spécifique à un type de véhicules, etc.), il peut être utile de vérifier qu'aucune technologie alternative ne permettrait d'obtenir des résultats similaires avec une meilleure efficacité.

Il en résulte qu'il faut chercher à intégrer la valeur d'option des projets pour tenir compte de l'irréversibilité de certaines décisions¹⁰.

2.3 Les incidences de long terme des projets de lutte contre le changement climatique

Il convient de rappeler que pour l'évaluation des projets et politiques qui seront opérationnels sur des périodes allant au-delà de 2050, il est nécessaire de disposer d'une trajectoire de valeur du carbone allant également au-delà de cette date. En effet, même dans un environnement qui serait décarboné, donner une valeur au carbone restera une exigence pour rendre durable le découplage entre PIB et émissions et valoriser les émissions négatives.

Dans une telle situation, les économistes ont une solution dite règle de Hotelling¹¹, qui

¹⁰ D. Bureau et C. Gollier (2009), « Évaluation des projets publics et développement durable », CEDD, Références économiques pour le développement durable, n° 8

¹¹ Hotelling, via un modèle mathématique, détermine notamment la valeur d'un stock de ressource

revient à maintenir une croissance de la valeur tutélaire du carbone au taux d'actualisation public, c'est à dire à en maintenir la valeur en monnaie constante pendant une période allant au-delà de 2050 jusqu'à ce que le stock de capital décarboné ait été constitué et amorti.

Toutefois, si ultérieurement les puits de carbone se réduisent, le maintien de la neutralité carbone nette impliquera d'aller plus loin sur la réduction des émissions brutes, ce qui peut nécessiter de mobiliser des technologies plus coûteuses que celles utilisées pour atteindre initialement la neutralité carbone en 2050, et donc il est possible qu'il soit nécessaire de continuer à augmenter la valeur tutélaire du carbone.

2.4 Les incertitudes sur les conséquences du dérèglement climatique

Si le dérèglement climatique ne fait plus de doute, il reste de très nombreuses incertitudes, notamment sur :

- l'ampleur des dommages, à la fois sur le plan physique (notamment hausse de température en fonction du cumul des gaz à effet de serre émis) mais aussi sur le plan économique (lien entre l'impact économique (par exemple en pourcentage du PIB) par rapport à la hausse de température, qui peut dépendre aussi de l'ampleur des mesures d'adaptation ;
- l'ampleur des efforts d'évitement pour limiter les émissions, qu'ils soient monétaires, liés au temps passé ou d'autres natures.

Ces incertitudes portent aussi sur l'échéancier de la manifestation des conséquences du dérèglement climatique et donc sur celui des mesures palliatives à prendre.

De telles incertitudes ont été documentées dans le rapport précité d'Alain Quinet.

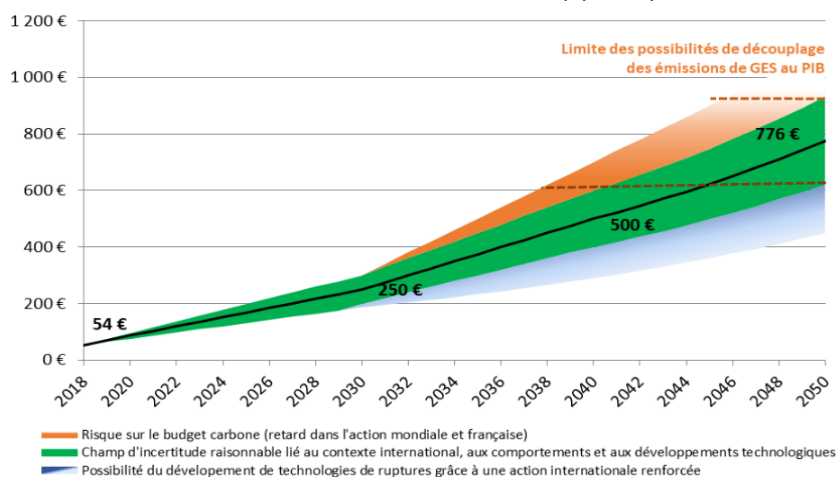


Figure 4 : La valeur de l'action pour le climat

Source : La valeur de l'action pour le climat-Rapport de la commission présidée par Alain Quinet (France Stratégie – Février 2019)

épuisable, l'évolution de cette valeur et le rythme d'extraction de la ressource en fonction du régime économique en vigueur (concurrence, duopole, monopole). Il en a été déduit une règle, selon laquelle le prix unitaire d'une ressource naturelle non renouvelable doit croître à un taux égal au rendement des autres actifs économiques.

2.5 L'analyse des incertitudes dans la prospective des transports

2.5.1 Une première approche dans le cadre des présents travaux

L'analyse effectuée dans le cadre de la prospective transports se limite au seul secteur des mobilités. C'est un exercice exploratoire dont l'objectif n'est pas d'apporter des réponses définitives à cette question complexe, mais de montrer que s'atteler à ce sujet difficile est à la fois souhaitable et faisable.

Du fait de cette limitation, au demeurant restreinte à ce stade aux seules mobilités terrestres voyageurs touchant la France, la modélisation effectuée fait l'hypothèse très simplificatrice que les politiques dans les autres secteurs dans tous les pays présentent des coûts d'évitement homothétiques à celles de ce dernier secteur touchant la France.

Bien évidemment les estimations des intensités des dommages par ensembles géographiques peuvent varier significativement d'un ensemble à l'autre, avec des vulnérabilités au dérèglement climatique souvent plus fortes dans les pays émergents. La structure des coûts d'évitement peut aussi être variable selon les ensembles économiques considérés. Toutefois la prise en compte de telles différences supposerait la mise en œuvre de modèles détaillés allant au-delà de l'actuel travail de prospective qui vise essentiellement à repérer des grandes tendances.

2.5.2 La méthode retenue

À cet effet, un premier ensemble vise à décrire pour chacun des scénarios de prospective des mobilités 2040 et 2060 de manière statique une estimation des coûts des dommages et des coûts d'évitement. L'application numérique a été effectuée pour un scénario de neutralité¹² dans la variante où il ne serait pas possible de dépasser une division par plus de 5,2 des gCO₂/voiture particulière-km (VP-km). De ce fait les mesures de sobriété à mettre en œuvre pour tenir l'objectif de neutralité carbone sont strictes et leurs coûts sociaux-économiques très élevés, par rapport à ce qu'ils pourraient être dans le cas où la division par 8 des gCO₂/VP-km pourrait être atteinte à terme (comme dans le scénario « pari technologique »).

Dans un deuxième temps, il est recherché quelle politique « statique » est optimale au sens socio-économique, au vu d'un critère de minimisation de la somme des coûts des dommages et des coûts d'évitement à l'intérieur d'un horizon de temps conventionnel.

Puis dans un troisième temps, des tirages au sort sont effectués sur des trajectoires d'aléas représentant le progrès des connaissances au cours des prochaines décennies sur les paramètres clés du système. La performance d'une règle de décision flexible par rapport à des règles définies *a priori* est examinée au vu de la minimisation des coûts totaux sur l'horizon conventionnel retenu. On se place donc du point de vue de l'analyse socio-économique traditionnelle (tout en effectuant d'autres simplifications).

2.5.2.1 Coûts des dommages

En ce qui concerne les coûts des dommages, les scénarios des travaux de prospective peuvent être comparés aux scénarios RCP du GIEC sous certaines hypothèses *via* les

¹² Se situant entre le scénario « pari technologique » et « pari sociétal ».

émissions mondiales cumulées obtenues.

Cette estimation du coût des dommages repose sur des hypothèses de proportionnalité. À partir des émissions nettes du secteur des transports terrestres de voyageurs en France, on effectue un prorata des émissions nettes mondiales tous secteurs, puis des émissions nettes mondiales cumulées tous secteurs ; on passe ensuite aux températures sur la base de travaux du GIEC et on en déduit les coûts annuels de dommages en pourcentage de PIB aux différentes années du XXI^{ème} siècle en utilisant une équation du second degré issue des travaux de Nordhaus faisant le lien entre dommages économiques et hausse de température (d'autres équations sont envisageables et pourraient dans leur principe être intégrées au modèle).



Illustration 4 : Communes en aval de Paris inondées par les eaux de la Seine - Crédit : Sylvain Giguet/Terra

2.5.2.2 Coûts d'abattement

Avec ces hypothèses, on peut décrire dans chaque scénario les évolutions de température au-delà de l'époque pré-industrielle.

Les coûts d'abattement dans les transports terrestres de voyageurs sont décomposés en :

- une part motorisation ;
- une part sobriété hors aménagement ;
- une part sobriété par l'aménagement ;

- une part liée à la production d'émissions négatives.

Le coût d'abattement dans ce secteur comprend plusieurs facteurs :

- des surcoûts monétaires (au sens du calcul socio-économique);
- des surcoûts liés à des hausses de temps passé, valorisés au moyen d'une valeur du temps.

En additionnant ces deux composantes, on obtient un coût généralisé d'abattement annuel, qui peut être ramené à des % de PIB. Pour passer à des coûts d'abattement tous secteurs monde, la même hypothèse d'homothétie est effectuée.

Cette hypothèse d'homothétie, d'une part entre « transports terrestres de voyageurs » et « tous secteurs » et entre « France » et « monde » d'autre part est bien entendu une simplification importante. La croissance tendancielle des émissions dans les transports terrestres de voyageurs constatée dans le passé est supérieure à celle de l'ensemble des secteurs économiques. À l'inverse, la croissance économique tendancielle est plus élevée dans le monde qu'en France, et donc également celle des trafics et des émissions. Chacun de ces deux effets est d'environ 2 % par an, mais jouent en sens inverse l'un de l'autre. Avec ces hypothèses particulières, les deux approximations semblent donc se compenser en première approche.

Si toutefois la tendance globale des émissions était décalée, celle des émissions cumulées le serait d'autant, et celle du coût des dommages le serait environ d'un facteur double (avec l'hypothèse d'un coût des dommages croissant comme le carré de la hausse de température, et donc le carré des émissions cumulées puisque cette dernière lui est proportionnelle). Si le coût d'évitement reste proportionnel aux émissions en première approche, celui-ci serait augmenté proportionnellement au décalage de la tendance globale des émissions.

2.5.2.3 Autres hypothèses de calcul

Dans ce modèle, toujours dans un souci de simplification, les coûts de production et les quantités d'émissions négatives ont été à ce stade laissées fixes.

La politique de sobriété a été décomposée en une part liée à l'aménagement, avec un effet cumulatif, et une part à effet plus instantané. Cette décomposition est cependant très fragile.

Ces estimations de coûts généralisés d'abattement ont été d'abord calculées à l'horizon 2060, puis aux horizons intermédiaires. Au-delà de 2060, ces coûts généralisés d'abattement sont supposés constants dans le temps en première approche en % du PIB.

Les politiques peuvent ensuite être pilotées par une variable d'effort, comprenant quatre composantes (motorisation, sobriété hors aménagement, aménagement, émissions négatives), permettant de constituer un *continuum* de politiques et les trajectoires de coûts des dommages et de coûts d'abattement associées.

Trois horizons sont prévus pour l'évaluation des politiques :

- un horizon correspondant à 2060, avec une moyenne de 2020 à 2060 des % de PIB perdus (dommages et abattement) sur la période ;
- un horizon plus lointain (séculaire) de 2100, avec une moyenne de 2020 à 2100 des

pourcentages de PIB perdus (dommages et abattement) sur la période ;

- un horizon encore plus lointain (multi-séculaire) à 2300, consistant à effectuer une moyenne de 2020 à 2300 des % de PIB perdus (dommages et abattement) sur la période, en les supposant constants au-delà de 2100.

Par simplification, le taux d'actualisation a été supposé nul et donc il n'y a pas de croissance dans le temps des valeurs d'action carbone selon la Règle de Hotelling. Cela permet d'utiliser un critère d'optimisation relativement simple puisque l'équi-pondération des années simplifie le calcul des bilans des différentes décisions envisageables. Au-delà des considérations éthiques souvent avancées pour soutenir le choix d'un taux d'actualisation nul, dans le contexte de cette étude prospective, ne pas actualiser les flux économiques et adopter des valeurs d'action carbone constantes revient à supposer une économie stationnaire dans la durée, ce qui n'est pas pleinement cohérent avec les scénarios étudiés qui supposent des transformations radicales des structures de dépenses et de recettes. Des versions ultérieures du modèle pourraient intégrer ces aspects au prix d'une complexité inaccessible aux échéances fixées pour ce travail.

2.5.2.4 Comparer des politiques statiques et dynamiques

Le modèle proposé vise à comparer deux types de politiques.

En premier lieu on considère des diverses politiques statiques au sens où l'on suppose qu'un décideur choisit de mener une politique telle que décrite dans l'un des scénarios en 2020, puis s'y tient quoiqu'il arrive, et quelles que soient les informations nouvelles qu'il pourrait acquérir. Ce genre d'analyse est tout à fait classique et se rattache aux analyses de sensibilité décrites par exemple dans le « Complément opérationnel G » du Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics de France Stratégie¹³.

En second lieu, on considère des politiques définies et adaptées progressivement en fonction des informations que le décideur est susceptible d'acquérir au cours du temps. En pratique, le décideur observe une information de synthèse à chaque début de période et il en déduit au moyen d'une table pré-établie la politique qui lui paraît optimale au vu de ces informations.

Ainsi, si les informations sur le lien entre le coût des dommages et la température, ou entre la température et les émissions cumulées sont plus inquiétantes qu'initialement, alors le décideur va mener une politique plus sévère impliquant des efforts plus importants.

Concrètement, si t est l'année étudiée et i le numéro du tirage au sort effectué, la trajectoire est définie par un coefficient multiplicatif $K(i,t)$ appliqué au coût des dommages à température donnée par rapport à la formule quadratique de Nordhaus rappelée précédemment.

Les lois de tirage au sort sont établies pour correspondre globalement à la loi de répartition des coûts du dérèglement climatique au cours du XXI^e siècle issue du sondage effectué dans un moteur américain de sollicitation et d'agrégation de prédictions en ligne basé sur la réputation. Ce moteur, dénommé Metaculus¹⁴, a pour objet de prédire le moment, la

¹³ Accessible à <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-guide-evaluation-g-analyse-de-sensibilite-final-final.pdf>

¹⁴ Voir le site <http://metaculus.com/>

nature et l'impact des progrès et des percées des connaissances scientifiques et technologiques.

Les coûts d'abattement ne sont pour l'instant pas supposés entachés d'un aléa dans la mesure où leur estimation semble plus prudente et relativement moins incertaine que le coût des dommages.

Pour évaluer la politique flexible, on examine avec le même parcours $K(i,t)$ comment elle se situe au vu de l'objectif (somme des coûts des dommages et d'abattement sur la période) par rapport à la politique statique semblant optimale *a priori* dans le même horizon.

Si la proportionnalité des politiques menées aux enjeux semble un bon principe, sa mise en œuvre semble délicate. C'est probablement la raison pour laquelle l'évaluation de l'opportunité de mesures de politiques publiques de sobriété des déplacements, allant au-delà du champ mieux balisé de celles sur les motorisations, est également difficile du fait de l'incertitude assez radicale sur les coûts des dommages qui pourraient résulter de leur non mise en œuvre.

Cette incertitude devrait conduire :

- d'une part à réactualiser périodiquement (une périodicité de l'ordre de cinq ans semblerait un bon compromis) les scénarios étudiés pour y intégrer les connaissances acquises depuis l'exercice précédent afin de lever au moins en partie certaines incertitudes ;
- et, d'autre part, étudier de façon concrète les conditions de mise en œuvre des décisions suspendues au titre de l'absence de proportionnalité à un instant donné de sorte que si un diagnostic de proportionnalité peut être posé lors de l'exercice suivant, les délais de mise en œuvre effective soient réduits, en particulier parce que les études de calage de l'ampleur et des conditions pratiques de mise en œuvre d'une décision conditionnelle ont été réalisées en temps masqué.

Conclusion

Les présents travaux, très exploratoires et réalisés avec des moyens extrêmement rustiques, avec de très nombreuses hypothèses simplificatrices, n'ont d'autre ambition que de proposer que les acteurs publics et les centres de recherches compétents se saisissent du sujet et développent un programme d'analyse approfondie de cette question qui devrait depuis longtemps être au cœur de la recherche des meilleures trajectoires décisionnelles.

Annexes

Annexe 1 : Composition du groupe de travail « Risques et incertitudes »

Nom	Prénom	Organisme
Massoni	Michel	CGEDD/MT
Sauvant	Alain	CGEDD/AQST
Auverlot	Dominique	CGEDD/MT
Ayoun	Philippe	CGEDD/MT
Kovarik	Jean-Bernard	Université Gustave Eiffel
Lepoutre	Julien	DGAC
Ménager	Thierry	CGEDD/MIGT
Nataf	Jean-Michel	CGEDD/TECI
Paul Dubois Taine	Olivier	IESF
Peng Casavecchia	Sophie	DGITM

Les auteurs remercient particulièrement Chloé Vallon, stagiaire Polytech Tours, à l'AQST en 2021 qui a réalisé le modèle de Monte-Carlo.

Annexe 2 : Typologie des incertitudes et exemples de mise en œuvre de la méthode des options réelles

Le présent document constitue une première tentative de réflexion sur les méthodes utilisables pour une décision publique optimisée en présence de fortes incertitudes. Le champ est celui des mobilités, et à ce stade se limite à celui de la seule mobilité des voyageurs.

La note aborde également des premiers exemples de mise en œuvre d'une approche basée sur les options réelles autour de la décision publique en présence d'incertitudes.

Quelles incertitudes majeures pèsent sur le système des mobilités ?

Il conviendrait d'effectuer une revue des incertitudes majeures qui sont susceptibles de peser significativement sur le système des mobilités, ainsi que les avantages qu'il confère d'une part, et les inconvénients qu'il engendre d'autre part.

Un des sujets majeurs d'incertitude qui pèse sur ce secteur (et d'autres) est celui du risque du changement climatique. La part des transports dans l'émission des GES y est non négligeable (environ un tiers en France) et croissante. Les dommages environnementaux potentiels importants à l'évidence ont mené la plupart des États à ratifier les accords de Paris visant à contenir la hausse de température sous les 1,5 degrés au-dessus de l'ère préindustrielle, qui constitue à l'évidence un objectif ambitieux, et susceptible de mettre sous tension l'ensemble des économies, malgré les progrès technologiques de décarbonation, également peut-être les modes de vie (« *lifestyles* »). Les progrès technologiques présentent des coûts, mais ceux qui pourraient être associés à d'éventuels changements de mode de vie présentent des coûts directs potentiellement modérés mais parfois également des co-avantages. En revanche en cas de changements majeurs de modes de vie, les coûts associés pourraient être très importants.

Avant de détailler ce point, il conviendrait d'effectuer une revue d'autres facteurs susceptibles d'impacter significativement le système des mobilités.

On peut penser à divers éléments environnementaux :

- la **pollution locale de l'air**. Elle entraîne des dommages à la santé des populations, et son poids dans les politiques publiques paraît significatif en zone dense essentiellement, menant les pouvoirs publics à prendre des mesures comme les ZFE par exemple ; en même temps, le risque semble à première vue relativement circonscrit du fait d'une part de son extension spatiale contenue aux zones les plus denses, et d'autre part au fait que l'essentiel du problème sanitaire devrait trouver sa solution dans un premier temps du fait de la réduction nette des polluants locaux des nouvelles générations de moteurs thermiques, puis par l'électrification d'une grande partie du parc, qui est une composante d'un scénario tendanciel menant à la fin de la commercialisation des véhicules thermiques en 2040 (avec une place possible pour les agro-carburants ou autres carburants décarbonés), au moins pour les modes terrestres ; à noter également que le sujet de la pollution de l'air liée aux systèmes de freinage est devenu non négligeable, et donc des progrès y seront également nécessaires, que le véhicule soit thermique ou électrique ; sauf exception, la localisation excentrée des aéroports minimise aussi les inconvénients de ce point de vue ;



Illustration 5 : Circulation automobile sur le périphérique parisien. Source : Terra

- le **bruit**. Il entraîne des dommages, essentiellement dans les zones denses, et à proximité de points singuliers (grands axes terrestres, grands aéroports,...); là aussi le risque semble relativement circonscrit dans la mesure où l'électrification du parc semble donner une perspective de maîtrise pour le mode routier en tout cas ; pour d'autres modes, la question se pose davantage, avec la question du bruit lié par exemple au survol aérien en cas de hausse de trafic, malgré la baisse tendancielle du niveau sonore unitaire, voire des problèmes de bruit émergent en cas de développement des drones et de vols urbains même électriques, notamment (mais pas seulement) aux phases de décollage et d'atterrissage ; la question du bruit ferroviaire remise en lumière notamment par la mise en service des LGV SEA et BPL ne sera pas non plus résolue par une électrification des voitures mais par des évolutions technologiques et comportementales du mode ferroviaire lui-même ;



*Illustration 6 : Avion volant au-dessus d'un microphone d'une station de mesure du bruit
Crédit : Laurent Mignaux/Terra*

- les **autres pollutions des milieux** (en dehors de la pollution de l'air). Aujourd'hui elles ne semblent pas constituer un problème majeur pour les transports (même s'il n'est pas inexistant, par exemple le risque de marées noires est lié largement à l'approvisionnement du secteur); en revanche, en cas de forte électrification des mobilités, ce risque pourrait devenir plus significatif, avec des enjeux autour de l'extraction des minéraux, du processus de construction du véhicule et surtout de sa batterie, ainsi que de son recyclage et sa déconstruction ; le risque est toutefois limité par plusieurs considérations : il est *a priori* localisable loin des zones denses, ce qui limite l'exposition de la majorité des populations, à la différence de la pollution de l'air d'un véhicule thermique qui a nécessairement lieu sur le lieu de circulation ; toutefois, le risque pourrait devenir important, au vu de l'échelle de production envisagée, ce qui devrait amener à examiner davantage les politiques publiques susceptibles de le minimiser et de le rendre compatible avec les objectifs de développement durables, qui pourraient passer par des normes et des processus de production adaptés, avec la potentielle difficulté de les faire appliquer dans le pays de production et d'extraction ou de déconstruction lorsqu'il ne s'agit pas de la France ;



Illustration 7 : Stockage de batteries avant recyclage - Crédit : Laurent Mignaux/Terra

- **les atteintes à la biodiversité.** La situation de celle-ci semble en forte dégradation, mais la part de cette dégradation liée au secteur des transports (par les effets d'usage des sols directs et induits par l'urbanisation, ainsi que les effets de la fragmentation) serait à comparer par rapport à celle d'autres secteurs, par exemple celle de l'agriculture notamment ; ce qui n'exclut pas toutefois une contribution des transports à travers les effets de coupure des biotopes induits par les nouvelles infrastructures de transport ; toutefois le risque est pour partie susceptible de remédiation avec des équipements réduisant ces effets de coupure et l'application de la démarche ERC (éviter réduire compenser) ; il convient également pour l'urbanisation lointaine périurbaine diffuse de noter les risques liés à la mise en contact nouvelle d'espèces animales avec la population humaine, susceptible de favoriser des zoonoses ; cependant le mode de vie (en Europe tout du moins) qui sépare humains et animaux sauvages semble également à première vue limiter ce risque, sauf démonstration du contraire. Toutefois on ne peut pas exclure que les progrès des connaissances révèlent un coût des dommages plus significatif ;



Illustration 8 : Pollution sur l'estran - Crédit : Bernard Suard/Terra

Il existe aussi des risques de nature non environnementale :

- **le vieillissement probable de la population**, susceptible d'accroître la part de la population éprouvant des difficultés à se déplacer, même si ce point est lui-même un peu incertain, la notion d'espérance de vie en bonne santé reposant davantage sur un déclaratif qui compare le ressenti de la personne interrogée à ses attentes plutôt qu'une évaluation de sa motricité elle-même ; toutefois, l'hypothèse qui semble la plus probable reste celle d'une hausse de la part de la population éprouvant des difficultés à se déplacer ; le risque concerne surtout les transports

publics déjà en retard dans notre pays pour l'application des normes existantes, induisant vraisemblablement dans les décennies à venir un besoin important de renforcement des équipements d'accessibilité, et/ou de services d'accessibilité à déterminer en recherchant efficacité et proportionnalité aux enjeux ; on ne peut pas non plus écarter un risque lié à la dégradation de l'aptitude à la conduite automobile, mais qui semble pouvoir être limité dans un premier temps avec le développement fort des aides avancées à la conduite (ADAS), puis du véhicule autonome.



Illustration 9 : Atelier de lecture avec les pensionnaires de l'Ehpad - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

- **la sécurité routière et plus généralement le risque lié à l'ensemble de la sécurité du système des transports** ; les dommages (nombre de tués et de blessés) sont cependant en baisse tendancielle ; par ailleurs, le développement des ADAS dans un premier temps, puis de véhicules autonomes autorisés par des autorités de régulation responsables semblent donner des perspectives globales de progrès, même s'il reste des points de vigilance, par exemple la protection des usagers vulnérables (piétons, cyclistes,...) dans le contexte de l'autonomie des véhicules et du développement des EDP et des nouveaux risques associés ; le sujet du risque sériel constitue aussi un autre point de vigilance ;



Illustration 10 : Accident de la route - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

- **l’approvisionnement énergétique de la mobilité**; les principales sources énergétiques actuelles de la mobilité sont en général situées loin des principaux marchés de consommation, avec des risques majeurs en cas de rupture d’approvisionnement, par exemple liée à un évènement géopolitique, notamment dans les zones où la principale ressource (pétrole) est située ; dans un contexte de développement du véhicule électrique, le risque approvisionnement comprendra deux composantes : celle de l’approvisionnement en minéraux pour les batteries, et celle de l’approvisionnement en électricité ; le premier risque, s’il n’est pas à négliger complètement, semble à relativiser, dans la mesure où une interruption éventuelle, dont la probabilité serait à apprécier au vu de la répartition mondiale des ressources (la concentration géographique des ressources exploitées actuellement peut être cependant assez forte pour certaines d’entre elles qui présentent un indice IHH15 supérieur à celui du pétrole) ne toucherait que la production de véhicules neufs mais permettrait au parc existant de fonctionner assez longtemps ; pour l’approvisionnement en électricité, le risque en cas de pénurie est plus immédiat et pourrait induire des tensions immédiates ; les sources de production sont cependant davantage locales, sauf en cas de recours à des combustibles fossiles venant souvent de loin, et le risque géopolitique plus mesuré pour l’approvisionnement en matières fissiles ; en revanche apparaît un risque de pénurie aléatoire, notamment si l’on combinait une très forte part de renouvelables intermittents, combinée avec peu de thermique avec CCS et peu de stockage, avec

¹⁵ Indice de Herfindhal et Hirschmann : Somme des carrés des parts de chaque pays dans la production actuelle d’une ressource

des risques portant davantage sur le saisonnier que le journalier. Pour le premier, il ne semble à ce stade y avoir que des perspectives de technologies mais qui n'ont pas encore été déployées à grande échelle, qui devraient sûrement bénéficier de baisses de coûts liées à un effet d'apprentissage, mais qui pourraient aussi rencontrer des obstacles en ce qui concerne leur acceptabilité ; il existe sûrement des possibilités d'agir par la modulation de la demande, en commençant par les utilisateurs électro-intensifs concentrés (industrie lourde, car les idées de « smart-grids » permettant une agrégation à grande échelle d'effacements volontaires diffus restent encore très hypothétiques, les anciens tarifs EJP16 d'EDF n'ayant pas pu être remplacés à ce stade). Leur effacement n'est pas très coûteux, mais une combinaison de ces hypothèses de forte électrification, de taux important d'intermittence dans la production électrique, et de risque d'absence de technologie de stockage notamment saisonnier pourrait mener à des risques pour le secteur des mobilités, pouvant certes être modérés par des politiques de flexibilisation (par exemple une recommandation de télétravail et plus généralement de modération des déplacements les jours de pénurie), ainsi que l'usage d'une énergie stockable (agro-carburants, H₂,...) en appoint au moins en cas de pénurie momentanée, mais avec des coûts induits sociétaux et techniques ;



Illustration 11 : Pipeline - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

- **la congestion**, susceptible de toucher essentiellement les zones et axes les plus denses aux heures et jours de pointe. Elle peut être liée au développement des trafics, mais aussi à d'autres facteurs, par exemple lors d'une phase de transition vers le véhicule autonome qui amènerait à accroître les intervalles de sécurité entre les véhicules ; il suffirait probablement d'une augmentation assez faible de ces intervalles pour majorer très fortement la congestion dans les zones et axes les plus denses à la pointe, du fait que la congestion n'est pas un phénomène linéaire ; il s'agit à l'évidence d'un point fort de vigilance, qui semble devoir amener à conditionner le développement des véhicules autonomes (voire de certains systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS)) à une non régression de ce point de vue, au moins dans les zones à enjeu de congestion, tout en maintenant un niveau de sécurité au moins équivalent ; le renforcement du partage de la voirie

¹⁶ Effacement des jours de pointe

pour l'attribuer à d'autres usages que la voiture (piétons, cyclistes, ...), ou les dispositifs d'incitation au partage des véhicules, ou de développement des transports collectifs, malgré leur utilité fréquente, peut également contribuer au renforcement de la congestion automobile, qui peut d'ailleurs parfois être recherchée pour réduire l'auto-solisme; avec un risque territorial et social, si ce type de politique pénalisait certains usagers plus que d'autres (par exemple les banlieusards souhaitant accéder au centre-ville, ou des usagers ne pouvant raisonnablement acquérir ou louer un véhicule aux normes environnementales adéquates); ce risque renvoie cependant essentiellement à des choix de politiques locales à examiner au cas par cas;

- **une évolution défavorable de la qualité de service**, à savoir l'adéquation du service proposé aux besoins de ses utilisateurs dans ses différentes dimensions, autres que celles déjà évoquées; l'AFNOR recense par exemple pour le transport public de voyageurs dans la norme NF EN 13816 huit piliers, à savoir: offre nominale, accessibilité, information, durée (ponctualité), attention au client, confort, sécurité/sûreté, environnement; en transports individuels les aléas sur les temps de parcours remplacent ceux liés à la ponctualité; ces différents piliers confèrent ensemble une valeur importante pour le bénéficiaire puisque l'on constate que lorsqu'ils ne sont pas au rendez-vous la fréquentation est fortement réduite;



Illustration 12 : Voiture du transilien taguée - Crédit : Bernard Suard/Terra

il existe sûrement de nombreuses voies de progrès, passant notamment par la mutualisation des meilleures pratiques (et inversement la limitation de celles qui seraient plus éloignées de l'état de l'art), et parfois par des investissements appropriés (par exemple les automatisations de métros) ou des redondances dans le dimensionnement des offres de services appropriés pour en accroître la résilience; cela renvoie néanmoins aux politiques menées par les autorités locales et les opérateurs sans risquer d'engendrer *a priori* un bouleversement majeur du système de transports.

Annexe 3 : La décision publique en présence de l'incertitude climatique

On en arrive ainsi au sujet des risques liés au changement climatique, qui en revanche dans certaines situations pourraient se révéler poser des risques systémiques pour les mobilités et les autres secteurs économiques.

Il convient toutefois de vérifier que les mesures prises pour éviter ou réduire ces risques restent proportionnées à l'ampleur du risque.

Du côté des coûts des dommages, divers travaux recensent les principaux dommages probables.

Certains sont quantifiables avec une incertitude relativement limitée :

- ainsi, les dommages liés à une remontée du niveau de la mer ne devraient pas dépasser très significativement dans une politique optimisée le coût de la relocalisation des populations exposées, dont le dénombrement est relativement peu incertain à un niveau donné de la mer, pourvu qu'une politique d'adaptation pertinente soit mise en place ; si on envisage une politique d'adaptation moins optimisée mais probablement plus réaliste, il convient d'y ajouter des dommages préalables à la relocalisation (par exemple des inondations temporaires). Le déplacement des infrastructures concernées devrait également être prévu, touchant particulièrement les ports compte tenu de leurs localisations, et à un moindre degré certaines routes et voies ferrées. Un impact sur l'économie touristique semble probable également;



Illustration 13 : La tempête Xynthia vue du ciel de Charente Maritime – Maisons isolées par les inondations.

Crédit : Bruno Landreau/Terra

- la question des conséquences sur le bâti, dans les zones où l'habitat ne pourrait plus être supporté dans de bonnes conditions de portance par les sols¹⁷, est également en première approche bornée par les coûts de reconstruction dans un lieu plus sûr, en cas de politique optimisée d'adaptation, mais l'ampleur du nombre de bâtiments et infrastructures susceptibles d'être touchés est plus incertaine ;
- la perte de rendement agricole est davantage incertaine. Il pourrait selon certains modèles y avoir au début même un progrès dans les rendements agricoles. Celle-ci pourrait être limitée par des mesures d'adaptation des types de cultures. On peut y ajouter les conséquences sur la pêche de l'acidification des océans. Toutefois, si pour des hausses de températures modérées, les impacts devraient également l'être, pour des hausses plus importantes, on pourrait s'orienter vers des pénuries alimentaires présentant des coûts considérables, surtout si elles frappaient les populations de manière inégalitaire, ce qui semble malheureusement assez vraisemblable ;

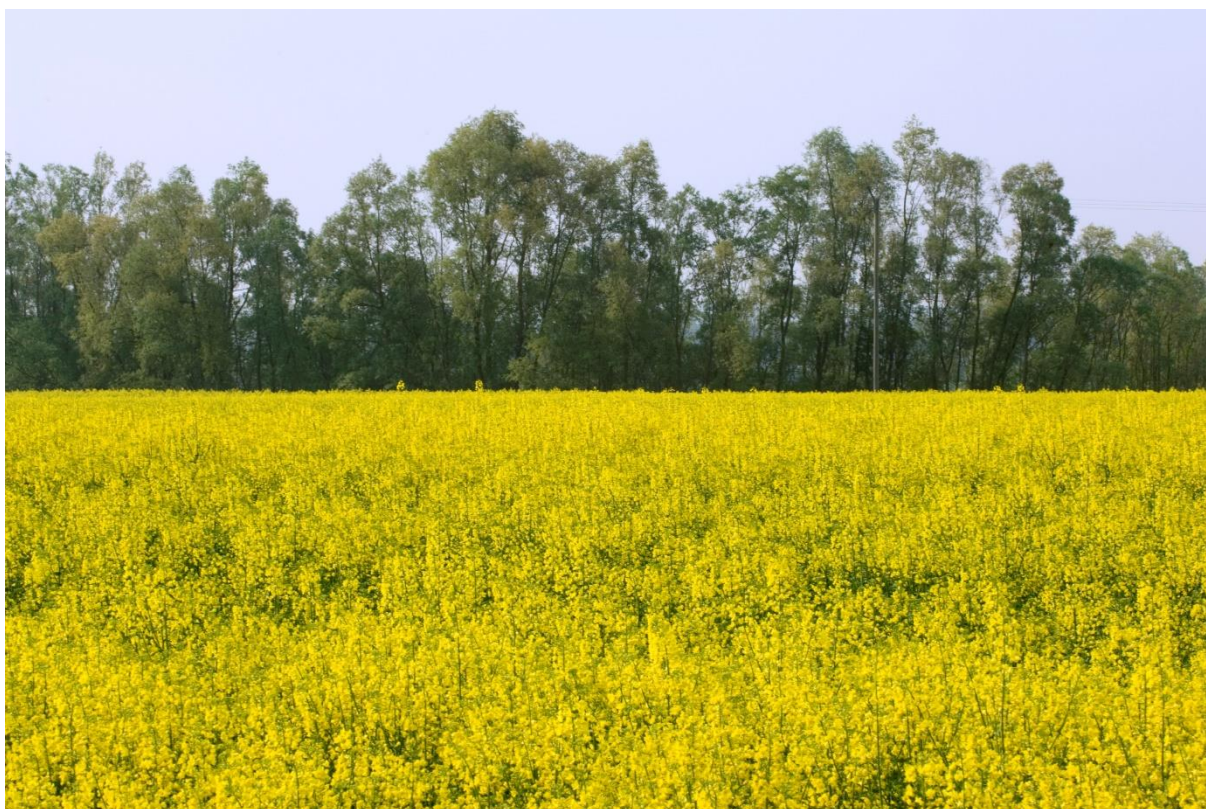


Illustration 14 : Champ de colza - Crédit : Laurent Mignaux/Terra

¹⁷ Voir notamment le site du BRGM et sa base de données ERRIAL, qui précise les risques différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols argileux : <https://assistance.brgm.fr/georisques/ou-trouver-carte-zones-exposees-au-phenomene-mouvement-terrain-differentiel-consecutif>

- L'augmentation des dommages liés aux événements météorologiques extrêmes est aussi une forme de dommages, dont les probabilités et intensités sont encore difficiles à estimer, et qui pourraient sûrement être contenus dans une certaine mesure par des politiques d'adaptation appropriées. Ces politiques devraient d'ailleurs concerner les infrastructures de transport. En particulier, les infrastructures linéaires ferroviaires semblent les plus fragiles compte tenu de leur complexité, et de la nécessité du bon fonctionnement de tous les composants pour un bon fonctionnement d'ensemble, à la différence de la route par exemple, ou des infrastructures enterrées naturellement davantage protégées, ou d'infrastructures ponctuelles (aéroports, ports, ...) hors zones fortement menacées.

Enfin, d'autres risques sont probablement plus difficiles à estimer et à quantifier, mais n'en sont pas néanmoins moins importants, et même potentiellement les plus importants dans le cas défavorable, du fait de la difficulté à en borner la valeur de l'étendue des dommages. Par exemple, le déplacement des biotopes traditionnels de diverses espèces à l'occasion du changement climatique pourrait mettre en contact des espèces autrefois séparées, augmentant ainsi la fréquence des zoonoses, dont certaines pourraient toucher l'espèce humaine, avec des coûts économiques et sociaux qui peuvent être considérables à chaque événement.

Ainsi, autant il est possible d'établir, et ce même à un niveau de température donné, un minimum du coût des dommages en prenant ceux dont on peut déterminer la valeur maximale, il semble assez difficile de donner, tous types de dommages confondus, une valeur économique plafond des dommages, surtout pour les variations élevées de température. C'est probablement de ce fait que le GIEC attire l'attention sur la hausse de valeur des dommages avec la température, et ce dès le dépassement de 1,5 degrés. Si celui-ci reste au-dessous de 2 degrés, les dommages additionnels semblent néanmoins plus modérés, ceci étant, la hausse plus importante du niveau de la mer est donnée avec un niveau élevé de confiance, avec de possibles dommages pour divers écosystèmes.

En tout cas l'analyse par les dommages ne semble pas pouvoir borner l'ampleur des efforts qui resteraient proportionnés ; seul un maintien en dessous de 1,5 degrés semble selon le GIEC de nature à garantir des dommages modérés.

Une autre approche pour chercher à borner le coût des mesures qui resteraient proportionnées serait le coût de production d'émissions négatives (CDR « *carbon doxyde removal* ») ou plus généralement d'élimination d'autres GES, et dans une certaine mesure plus partielle les SRM (réduction de la radiation solaire), même si cette technologie ne changerait pas certains dommages comme l'acidification des océans.

Il existe plusieurs technologies de CDR, mais d'après le GIEC¹⁸, on ne dispose d'aucune garantie de déploiement possible à l'échelle suffisante. Or (p96) « tous les chemins analysés limitant le réchauffement à moins de 1,5 degrés sans dépassement ou avec un

¹⁸ *Mitigation pathways compatible with 1,5 C in the context of sustainable development* : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

dépassement limité utilisent des CDR à un certain niveau. » et « plus le délai est long pour atteindre la neutralité, plus la probabilité de devoir recourir aux CDR pour retourner aux 1,5 degrés après le milieu du siècle est élevée ». Autrement dit, sans CDR suffisant, le dépassement ne peut rester temporaire, ou alors impliquer des mesures encore plus drastiques.

Certaines ne posent pas de problèmes technologiques (par exemple l'afforestation ou la reforestation (BECCS) ou probablement le « biochar »), mais pourraient être limitées par la surface disponible, qui doit aussi nourrir la population humaine et animale, sans compter les besoins en agro-carburants (solides, liquides ou gazeux) que peuvent exprimer certains secteurs, dont celui des transports, particulièrement lorsque l'électrification est difficile (longue distance terrestre) ou n'est pas envisageable (maritime et aérien, hors courts parcours). D'autres technologies sont mentionnées, par exemple la capture directe dans l'air (DACCS), mais le GIEC rappelle qu'entre des expériences à petite échelle et un déploiement à l'échelle requise il reste de nombreuses incertitudes, par exemple les quantités de déchets impliquées, sans mentionner les ressources en eau ou en énergie, ou les enjeux de pollution des milieux. Il en va de même pour les SRM dont la faisabilité à grande échelle semble à ce jour en tout cas incertaine.

L'autre incertitude contextuelle majeure est l'ampleur du risque pris en cas de dépassement, même temporaire, d'une température de 1,5 degrés. Si ce dépassement (« overshoot ») est possible, l'effort peut être temporairement limité, même s'il faudra probablement à un moment revenir à des concentrations plus faibles, et donc aller au-delà de la neutralité carbone, mais dans un contexte où on peut espérer que certaines technologies favorables seront davantage arrivées à maturité.

Les efforts devraient être majorés en cas de non linéarités, susceptibles d'être liées à la survenance de boucles de rétroactions positives (par exemple des dégagements de méthane par dégel du pergélisol, ou des changements de l'albedo) qui viendraient l'emporter sur les boucles de rétroaction négatives. À ce stade cette possibilité semble donnée avec un niveau de confiance moyenne, donc ne pas être exclue mais pas confirmée non plus. « il y a une possibilité que les modèles sous-estiment la réponse en température de long terme » du fait « de la non prise en compte des boucles de rétroaction du pergélisol et des autres gaz que le CO₂ » (p104).

Finalement, on arrive à ce que le niveau d'effort proportionné à ces conditions soit très élevé (le GIEC cite environ 14 500 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2050, 19 300 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2070 et 30 100 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2100 comme borne supérieure en scénario « *below 1,5* ») (page 152) si on combine à la fois les deux hypothèses de faible niveau des CDR et de nécessité de s'en tenir strictement à une trajectoire restant en dessous de 1,5 degrés sans dépassement.

C'est ce qu'on retrouve également dans le seul secteur des transports lorsqu'on combine pour les CDR la prise en compte de l'augmentation des émissions négatives prévues par la SNBC (95 MtCO₂ au lieu de 30 environ, tous secteurs confondus, avec un tiers pour les transports) les hypothèses les plus optimistes sur le plan technologique (large électrification décarbonée des modes terrestres, solutions de motorisations décarbonées pour le maritime et l'aérien, et possiblement une partie du terrestre interurbain éventuellement difficile à décarboner), avec des mesures de sobriété à coût modéré des mobilités (développement du télétravail pour ceux qui peuvent certains jours par semaine, remplacement de certains déplacements d'affaires par les télécommunications, hausse

des emports des voitures grâce à un système associant des véhicules autonomes partagés en complémentarité modale avec des TCU lourds renforcés dans les zones denses et moyennement denses, renforcement des itinéraires cyclistes et des VAE,...) selon les meilleures pratiques possibles raisonnablement documentées, auxquelles il conviendrait pour atteindre la neutralité des mobilités voyageurs d'ajouter des mesures de limitation des déplacements dont une estimation, au vu de l'élasticité prix de la demande, révèle un prix implicite de l'ordre de 25 000 euros/tCO₂eq, donc d'un ordre de grandeur proche des 30 000 USD/tCO₂eq évoqués ci-dessus. Il peut y avoir débat pour savoir si la neutralité des mobilités correspond strictement ou pas à la neutralité tous secteurs. Mais en première approche une sensibilité de la part des transports dans les émissions de 40 % au lieu de 30 % par exemple ne change pas le niveau des prix implicite significativement, qui restent très élevés.

En conclusion, on ne peut exclure que des mesures assez drastiques correspondant à une valeur d'action carbone de l'ordre de 25 000 €/tCO₂eq (par effet d'une taxe, ou d'une approche de rationnement ou une combinaison des deux) puissent dans certains cas être considérées comme potentiellement proportionnées. L'effet de telles mesures sur la mobilité serait à l'évidence extrêmement fort, avec par exemple le coût d'un déplacement terrestre correspondant à une quinzaine d'euros le litre équivalent (malgré une motorisation électrique), ou bien des prix de vols intercontinentaux au-delà de 10 000 euros, et ce malgré une motorisation avec des agro-carburants ou un avion à hydrogène vert.

La contrainte s'assouplit si on s'autorise un peu de dépassement avec une borne supérieure à 220 USD/tCO₂eq en 2030, 1050 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2050, 1100 USD/tCO₂eq en 2070 et 2340 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2100 dans un scénario à 2 degrés, la contrainte étant moins sévère. Le bas de fourchette dans ce même scénario, vraisemblablement avec davantage de CDR atteint 45 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2050, 120 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2070 et 175 USD₂₀₁₀/tCO₂eq en 2100 donnant un plancher.

Si on regarde la borne inférieure du « *below 1,5* » degrés, on serait à 135 USD/tCO₂eq en 2030, 245 USD/tCO₂eq en 2050, 420 USD/tCO₂eq en 2070 et 690 USD/tCO₂eq en 2100, donc vraisemblablement avec une neutralité stricte sans dépassement mais des technologies de CDR ou autres abondantes.

Une fois ce constat effectué, on peut le tempérer par différents éléments plus rassurants, qui amènent à ne pas envisager de prendre inconditionnellement et immédiatement des mesures de cet ordre :

- il est possible que des technologies de CDR (voire de SRM) puissent être déployées à l'échelle requise ; dans ce cas leur coût unitaire viendrait borner le niveau de l'effort proportionné ; divers éléments de littérature semblent situer ce niveau à quelques centaines d'euros par tonne de CO₂, par exemple pour la DACCS, mais bien sûr dans la mesure où ces technologies pourraient être déployées à temps et à l'échelle nécessaire, et dans des conditions acceptables relatives à la pollution des milieux ;
- la nécessité de rester strictement en deçà de 1,5 degrés n'est avérée que si le changement climatique est nettement non linéaire dans sa relation dose réponse ; il semble qu'on ne puisse pas le garantir ni son contraire, même si certains travaux émergents pointent un risque peut-être surestimé (par exemple le modèle

« escimo »¹⁹, mais qui est controversé du fait de sa grande simplicité) ; les investigations géologiques relatives à la vitesse de réchauffement lors d'épisodes géologiques antérieurs ne semblent pas permettre de conclure non plus, le majorant de la durée de la remontée brusque des températures semblant néanmoins se réduire avec le progrès des connaissances scientifiques, mais sans pouvoir non plus affirmer que ce type d'évènements se serait produit à une échelle décennale ou séculaire ; si l'on peut dépasser 1,5 degrés temporairement, même sans CDR significatif, le prix implicite des mesures baisserait significativement ;

- il est possible que la neutralité des mobilités soit un objectif plus difficile que celui de la neutralité tous secteurs confondus ; il ne semble toutefois pas y avoir de données précises à ce sujet, même si les conditions physiques du transport aérien (nécessité de soulever l'énergie et de la contenir dans un petit volume) en font probablement un des secteurs les plus contraints ; mais des tests de sensibilité amènent à penser que l'effet de cet aléa ne serait pas aussi important que les deux précédents ;
- certains gaz à effet de serre ne se dissipent qu'au bout de durées séculaires, par exemple le CO₂ qui est le principal GES émis par les transports ; toutefois, il existe des GES à plus faible durée de vie (décennies) (SLFC), par exemple le méthane, dont on pourrait réduire fortement les concentrations rapidement par des réductions des émissions, sous réserve que l'inertie technico-économique le permette ; dans le secteur des transports, pourrait être concernée la vapeur d'eau émise par les avions, présentant aujourd'hui probablement un pouvoir radiatif important mais qui pourrait être fortement réduite par des inflexions de trajectoire si des recherches récentes étaient confirmées, ou à défaut en cas de situation extrême par une forte modération du transport aérien ;



Illustration 15 : Démonstration de vol au Salon du Bourget - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

¹⁹ <http://www.2052.info/escimo/>

il est possible qu'à un niveau moindre en cas d'arrêt des nouvelles émissions (scénario ZEC) l'effet de l'acquis CO₂ soit réduit également à un moindre degré ; ces éléments semblent également contribuer à une possibilité d'attente avant d'implémenter des mesures à coût économique et social très élevé.

D'un autre côté, il semble aussi y avoir un consensus sur le fait qu'il sera nécessaire de prendre des mesures de l'ordre d'au moins une centaine d'euros par tCO₂ au terme du milieu du XXI^{ème} siècle. Le rapport Alain Quinet 2 aboutit à une valeur plus élevée, de l'ordre de 770 €/tCO₂eq en 2050. L'établissement de cette valeur est cependant assez fragile, dans la mesure où elle semble reposer essentiellement sur une estimation du coût d'un objectif vers 2030 plus modéré, puis son prolongement au moyen de la règle de Hotelling. Comme il est difficile de savoir si cet objectif intermédiaire est ou non cohérent avec la neutralité, ni avec quelle trajectoire de neutralité (« *below 1,5* », « *1,5 low* », « *1,5 high* »,...) d'ailleurs, sans mentionner la valeur du taux de croissance du prix utilisé à 4,5 % par an, les incertitudes demeurent majeures.

L'ensemble de ces considérations amène à devoir envisager quelques esquisses de recommandations :

- des mesures dont les coûts implicites à l'échéance du milieu du siècle ne dépassent pas quelques centaines d'euros par tonne de CO₂ semblent *a priori* proportionnées dans tous les cas, en les inscrivant dans une trajectoire d'augmentation de la valeur d'action carbone dans le temps ;
- mais il convient également de prendre en considération des mesures plus coûteuses dont le caractère proportionné est à ce jour un peu incertain, mais pourrait se confirmer dans le futur plus ou moins éloigné ;
- ce qui amènerait à affiner l'étude de ces mesures, et définir également des mesures de précaution, à coût relativement limité, mais qui permettraient d'implémenter à coût modéré et rapidement des mesures plus drastiques si celles-ci se révélaient finalement nécessaires ;
- ainsi que la mise en place d'outillage d'observation des risques approprié, notamment pour les risques dont l'impact semble le plus élevé (impossibilité de déploiement de CDR et SRM, nécessité de s'en tenir strictement à la trajectoire 1,5 degrés sans flexibilité), afin de ne pas tarder à prendre les mesures appropriées si ces risques devaient se confirmer ;
- à noter aussi que des mesures dont l'impact mettrait très longtemps à se révéler pourraient dans certains cas se révéler justifiées à un horizon proche, si toutefois elles présentaient un impact significatif et un coût raisonnable ; on peut se poser par exemple la question par rapport à des mesures de modération de l'étalement urbain, qui devraient présenter des impacts sur des durées très longues de nature pluri-décennales, si ce n'est séculaires ; mais en revanche si l'ampleur de la modération apportée se confirmait comme seulement modérée, l'intérêt de telles mesures dont le coût économique n'est probablement pas modéré (en tout cas dans un pays globalement peu dense comme la France) reste à confirmer.

In fine, la construction d'un modèle de type Monte-Carlo²⁰ semble nécessaire, pour définir des trajectoires en fonction de diverses décisions publiques possibles et de l'ensemble des aléas à prendre en considération.

L'exercice est rendu plus complexe par le fait qu'il n'y a pas qu'un seul horizon temporel de décision, et surtout pas qu'un seul échelon géographique de la décision publique.

Celle-ci peut ainsi concerner le niveau local (politique de voirie, politique de limitations environnementales locales de type ZFE-m, investissements dans des TCU ou des pistes vélos, politiques des AOM,...), régional (infrastructures régionales, politiques des AOM régionales,...), national (bonus-malus écologique, aides, politiques de TC nationales, AO nationale, normes nationales ou modalités de déclinaison de normes européennes, aides nationales à la R&D, politique industrielle nationale,...), européen (réglementation européenne, normes européennes, aides à la R&D européenne, politique industrielle européenne, politique de concurrence,...), mondial (normes de l'OMI et de l'OACI, technologies disponibles,...).

Si les dommages liés au changement climatique sont mondiaux, plusieurs éléments sont à prendre en considération : l'impact pourrait être plus fort dans certains pays et régions que d'autres, *a priori* notamment pour les pays les plus pauvres ou des zones manifestement très exposées (bord de mer par exemple), et pour un pays ou une zone, si prendre des mesures un peu plus strictes que d'autres peut apporter un avantage de compétitivité (en permettant ensuite de vendre son savoir-faire et ses technologies aux autres lorsqu'ils rejoindront à leur tour ce niveau), se situer à un niveau d'exigence trop élevé peut aussi se révéler contreproductif en matière d'emploi et d'attractivité. Par ailleurs, attendre davantage peut aussi être intéressant pour récupérer des technologies sans avoir eu besoin d'investir, avec toutefois le risque de perdre la maîtrise des filières technologiques à haute valeur ajoutée et de devenir un pays à faible revenu et à faible valeur ajoutée dans la division internationale du travail.

Un des problèmes pour la mise en œuvre d'un tel modèle de Monte-Carlo est que de nombreuses incertitudes ne semblent pas aisément quantifiables. Qui peut donner une probabilité d'impossibilité de déployer des CDR à grande échelle ? ou de présence de boucles de rétroactions positives ? ou de risque d'échec de développement de technologies très innovantes ? ou de risques sur leur acceptabilité sociale ? faute de mieux, une approche pourrait consister néanmoins à utiliser des probabilités subjectives, et à effectuer des tests de sensibilité.

Dans certains cas, il est vraisemblable que dans le champ du vraisemblable, on puisse tirer une conclusion, favorable ou pas, mais pas forcément dans tous les cas.

Par ailleurs, avant de se lancer dans la construction d'un modèle de Monte-Carlo qui pourrait se révéler difficile à interpréter, il pourrait être utile d'examiner l'effet de décisions unitaires, toutes choses égales d'ailleurs, et ce en présence d'incertitudes dont on peut situer même vaguement l'ampleur. À cet effet, on pourrait pour quelques cas types mobiliser la théorie des options réelles.

²⁰ Type d'algorithme de calcul qui utilise un échantillonnage aléatoire répété pour obtenir la probabilité d'occurrence d'une série de résultats, méthode utilisée pour estimer les résultats possibles d'un événement incertain

On trouvera ci-après quelques exemples d'applications, qui semblent présenter les mérites suivants :

- expliciter davantage le cas où une technologie est susceptible d'être utile ;
- en déduire une valeur assurantielle contre la survenance de contextes défavorables ;
- la comparer en ordre de grandeur aux coûts de développement.

L'approche montre que la valeur assurantielle croît avec la trajectoire nominale de la valeur d'action carbone, mais aussi (ce qui est ce qu'apporte l'approche optionnelle par rapport à une approche statique) avec le niveau d'incertitude autour de celle-ci. Dans la plupart des cas étudiés ci-dessous, l'ampleur des valeurs assurantielles obtenues semblent plutôt faire pencher la balance en faveur des deux technologies étudiées (accompagnement du véhicule électrique, développement d'un avion à hydrogène vert surtout dans le cas vraisemblable de pénurie d'agro-carburants), ou d'une politique de sobriété « moyenne » des déplacements (à coûts économiques et sociaux modérés), en revanche une politique de sobriété « renforcée » ne trouverait une justification manifeste qu'en cas de confirmation des conditions décrites ci-dessus (peu de CDR, et relation dose réponse climatique non linéaire), mais peut-être des mesures de précaution proportionnées qui restent à définir.

Annexe 4 : Tentative de mise en œuvre des options réelles

Coût social du carbone

Le coût social du carbone désigne le coût économique des dommages liés à l'émission d'une tonne de CO₂ ou équivalente. Il est utilisé dans cette démarche pour estimer les coûts des dommages en matière d'effet de serre notamment en cas de dépassement de la neutralité carbone à l'horizon d'étude de 2060.

L'approche tient compte d'un ordre de grandeur de deux durées de vie du CO₂, principal gaz à effet de serre concernant les transports, soit environ 350 ans, même si une partie des gaz émis pourrait persister plus longtemps.

Le sujet est probablement assez structurant pour la mise en œuvre de la démarche, dans la mesure où s'il n'y avait pas de probabilité qu'il y ait un coût au-dessus d'un certain seuil, il semble peu probable que des mesures présentant un coût d'évitement plus élevé puissent être proportionnées.

Les estimations relatives à ce coût social du carbone (CSC) semblent différer largement selon les auteurs et les hypothèses. Plusieurs facteurs semblent jouer notamment :

- la gravité des dommages eux-mêmes, et ce même dans une trajectoire d'émission donnée, à la fois du fait des aléas de passage des ppm de CO₂ (et équivalents) à la température de l'atmosphère, mais aussi des conséquences de celle-ci sur le fonctionnement économique et des éco-systèmes ;
- cette appréciation peut évoluer dans le temps avec l'approfondissement des connaissances scientifiques sur les dommages ;
- la valorisation économique elle-même de ces dommages, qui n'est pas toujours aisée ; certaines approches ne retiennent que la part pas trop difficilement valorisable, dans une approche par défaut, avec le risque de sous-estimer le CSC ;
- il peut s'agir notamment des risques de catastrophes, souvent difficiles à estimer ;
- le taux d'actualisation retenu (plus il est faible et plus le CSC est élevé) ;
- la dispersion autour d'une valeur centrale, très difficile à apprécier.

Un des modèles d'évaluation intégrés (IAM) fréquemment cité est le modèle DICE de Nordhaus et al²¹, mais figurent aussi FUND²² et PAGE.

DICE a fait l'objet de commentaires par le PIK (Institut de Postdam pour le climat). Ceci a abouti, avec une nouvelle version du modèle DICE, à ce qu'une température de moins de 2 degrés ²³ soit économiquement optimale, à la différence des 3,5 degrés que

²¹ *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*

²² *Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*

²³ <https://www.nature.com/articles/s41558-020-0833-x> et

<https://www.pik-potsdam.de/en/news/latest-news/an-economic-case-for-the-un-climate-targets-early->

recommandait initialement Nordhaus :

“Under the UN Paris Agreement, countries committed to limiting global warming to well below 2 °C and to actively pursue a 1.5 °C limit. Yet, according to the 2018 Economics Nobel laureate William Nordhaus, these targets are economically suboptimal or unattainable and the world community should aim for 3.5 °C in 2100 instead. Here, we show that the UN climate targets may be optimal even in the Dynamic Integrated Climate–Economy (DICE) integrated assessment model, when appropriately updated. Changes to DICE include more accurate calibration of the carbon cycle and energy balance model, and updated climate damage estimates. To determine economically ‘optimal’ climate policy paths, we use the range of expert views on the ethics of intergenerational welfare. When updates from climate science and economics are considered jointly, we find that around three-quarters (or one-third) of expert views on intergenerational welfare translate into economically optimal climate policy paths that are consistent with the 2 °C (or 1.5 °C) target.”

Xiangzheng Deng et al ont effectué en 2019 une méta-analyse²⁴ des estimations de la valeur du coût social du carbone.

Ils rappellent les structures habituelles des modèles IAM, qui intègrent de très nombreuses hypothèses, comme le montre le schéma ci-dessous :

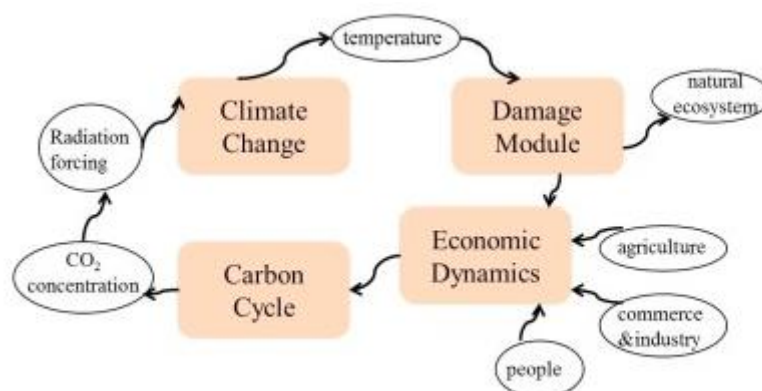


Illustration 16 : Modèle IAM

Ils concluent à une valeur moyenne de 30,78 USD par tonne de CO₂ en retenant les études publiées dans des revues à comité de lecture, et en se ramenant à une hypothèse de taux de préférence pour le présent de 3 % par an. Une indication sur la dispersion au sein de l'usage des mêmes modèles situe la valeur du 95^{ème} percentile à 72,8/37 soit 1,97 fois la moyenne.

La fourchette indiquée est très large, allant de -13,36 à +2386,91 USD/tCO₂, ce qui laisse

and-strong-climate-action-pays-off

²⁴ Voir : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618334589?via%3Dihub>

présumer des incertitudes demeurant importantes.

Ils indiquent également que les valeurs du coût social du carbone (CSC) ont tendance à augmenter avec le temps. Également plus la hausse de température visée est basse, et plus les valeurs du CSC obtenues sont élevées.

La date de publication moyenne des études est 2007. Les horizons étudiés seraient autour de 2045 en moyenne.

Si on part de la valeur moyenne, en supposant qu'elle se rapporte à 2007, cela mènerait à environ 125 €/tCO₂eq en 2060 avec 3 % de taux de croissance par an sur 53 ans au niveau de l'hypothèse sur le taux d'actualisation retenu. (avec un taux de change de 1 euro=1,18 USD). La valeur au 95^{ème} percentile en gardant un ratio de 1,97 fois la moyenne se situerait à 1,97*125= 246 €/tCO₂ en 2060.

Resources for the future (RFF) a également effectué une revue des valeurs du CSC. Il aboutit, à 3 % de taux d'actualisation, à une moyenne de 50 USD/tCO₂ en 2020, correspondant à 138 €/tCO₂eq en 2060 soit un montant assez proche du précédent.

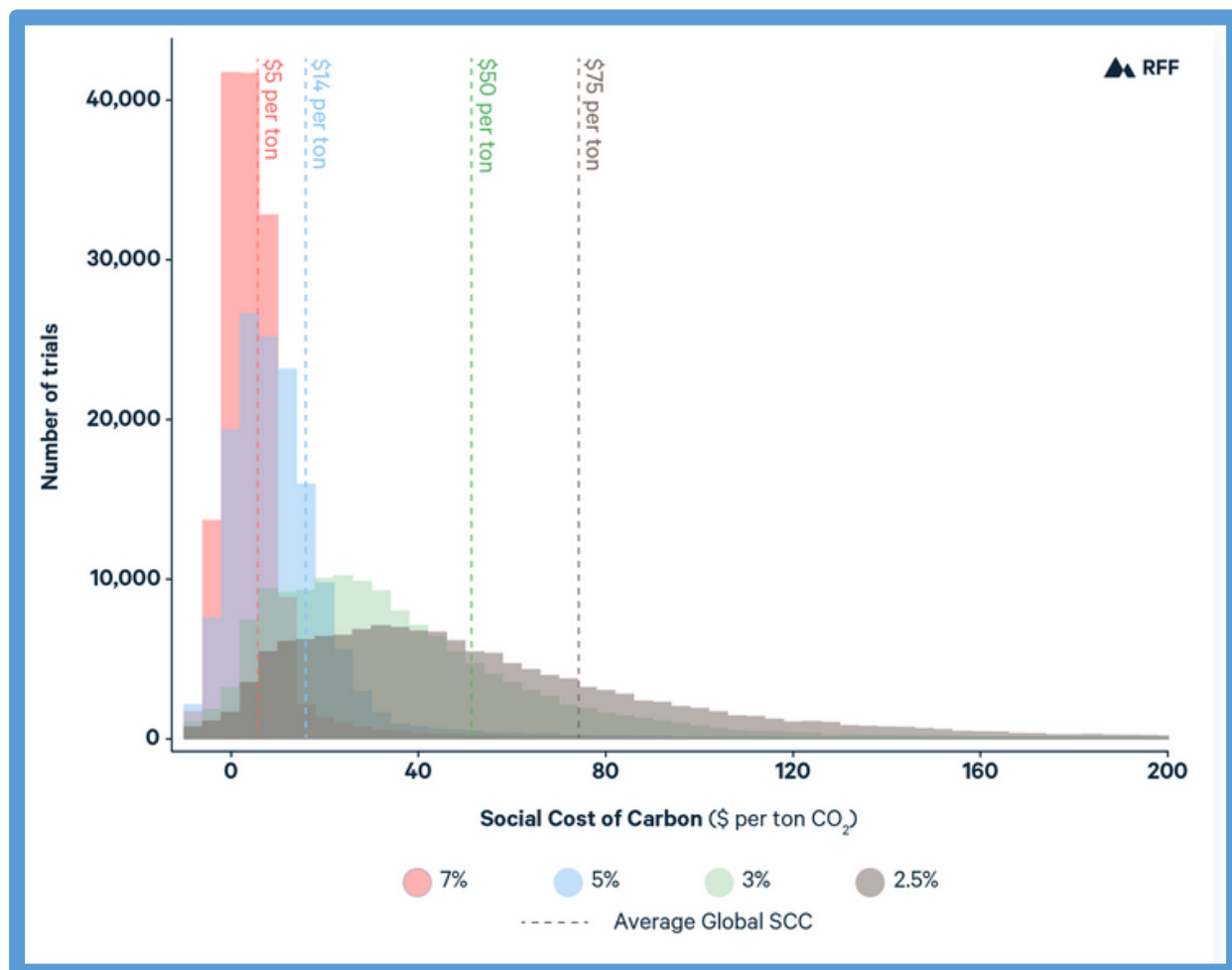


Illustration 17 : Coût "social" du CO₂ (USD/tonne CO₂) – Source : Resources for the future (RFF)

On voit ici une différence assez importante avec les estimations produites à ce stade en matière de politiques qui seraient nécessaires pour viser la neutralité des mobilités voyageurs. La méthode employée a consisté à décrire les évolutions possibles des technologies de motorisation et les émissions de GES qui en résultent en analyse de cycle de vie (ACV), puis examiner si des réductions de mobilité seraient nécessaires pour tenir un objectif de neutralité des mobilités, en estimer l'ampleur, puis estimer l'effet prix nécessaire pour atteindre un tel objectif au moyen d'une hypothèse d'élasticité prix, et d'en déduire un prix de la tonne de CO₂ équivalent.

On ne peut pas non plus exclure que le prix implicite de la tonne de CO₂ permettant de viser la neutralité carbone des mobilités voyageurs à un niveau bien plus élevé, dans une fourchette de 20 000 à 30 000 euros par tonne de CO₂eq, (ou une alternative de restriction quantitative via une carte carbone) pour atteindre un tel objectif en 2060 une fois avoir épuisé toutes les technologies envisageables.

Quelles peuvent être les principales causes de ces différences d'évaluation très importantes ?

- La neutralité carbone des mobilités, et *a fortiori* celle des seuls voyageurs, pourrait être plus difficile à atteindre que la neutralité carbone tous secteurs.

Il s'agit d'une hypothèse qui ne peut être exclue. Toutefois, plusieurs études (université d'Aalto²⁵, the CCC britannique²⁶) indiquent que le secteur qui serait le plus difficile à restreindre serait celui de l'alimentation, notamment du fait de la nécessité d'un apport calorique minimum, même avec un changement de régime alimentaire devenant moins carné.

Néanmoins, les difficultés spécifiques du transport aérien, du fait des contraintes volumiques et massiques de l'énergie à bord, majorée par les contraintes liées aux enjeux de sécurité, peut en faire un secteur particulièrement difficile à décarboner. Implicitement, l'étude du the CCC britannique laisse penser, en prévoyant un quota d'émissions de long terme important pour le transport aérien que sa décarbonation est plus difficile.

Il paraît assez peu probable que le regard sur les mobilités marchandises change très fondamentalement les choses, d'une part du fait que les émissions de GES des voyageurs sont environ deux fois plus élevées, et d'autre part que les difficultés à réduire les trafics pourraient être encore plus fortes que celles pour les voyageurs, la substitution par les télécommunications paraissant très difficiles, sauf pour quelques produits numérisables (livres...). Si la réduction en ACV des émissions par km d'un PL semble un peu plus aisée que celles d'un VL, l'électrification des navires semble, au-delà des parcours courts, assez difficile, et donc renforcer les difficultés de la décarbonation.

En revanche, sur le transport aérien, on ne peut pas écarter que la contrainte de

²⁵ Voir : <https://www.aalto.fi/en/departement-of-design/15-degree-lifestyles> : "Based on the domain-specific gap analysis with the targets, the range of footprint reductions required for the developed countries for 2030 (2050) are at least 47% (75%) in nutrition, 68% (93%) in housing, and 72% (96%) in mobility". Les taux de réduction d'empreinte de l'alimentation sont les moins nets, et ensuite les différences entre le secteur du logement et celui de la mobilité ne semblent pas très nettes, et s'il y en avait une, la réduction d'empreinte est plus forte pour la mobilité.

²⁶ Climate change committee britannique.

neutralité sur les mobilités soit plus forte que celle sur tous secteurs, et que cela puisse éventuellement jouer quelque peu, même si la valeur d'action carbone devrait être fixée par celle de l'action marginale nécessaire pour atteindre l'objectif visé.

- Des différences peuvent exister sur les hypothèses des évolutions technologiques de motorisation.

À ce stade, une revue des contraintes associées à diverses technologies de motorisation n'a pas amené à retenir une hypothèse de production d'émissions négatives à échelle significative, qu'il s'agisse de capture du carbone en vue de sa séquestration ou de sa réutilisation (notamment du fait des rejets induits), ni *a fortiori* de capture directe du carbone (DACCS), là aussi même en cas de faisabilité économique du fait des quantités de rejets induites. Une quantité d'agro-carburants permettant au moins le vol des avions (hors courts courriers susceptibles d'être électrifiables, avec une dose d'hydrogénation) a été envisagée dans l'hypothèse technologique la plus haute, tout en notant l'ensemble des risques pointés notamment par la Dena²⁷ allemande qui amènent à penser qu'il n'y a pas de garanties en la matière, loin de là. L'afforestation à un niveau significatif n'a pas non plus été retenue compte tenu des tensions vraisemblables sur les terres qui doivent aussi nourrir les populations.

Par ailleurs de fortes innovations sociétales, avec des véhicules autonomes partagés, une forte dose de télétravail allant jusqu'à trois jours par semaine en moyenne, et ce pour 50 % des emplois grâce à une poursuite de la numérisation des processus ont été retenus, ce qui se situe plutôt dans une extrapolation ambitieuse des tendances constatées lors de la crise sanitaire en 2020, qu'il semble difficile de qualifier de manifestation sous-estimées.

En revanche, un fort développement du véhicule électrique dans l'ambiance technologique la plus optimiste, avec des possibilités d'autres types de motorisation terrestre, a été retenu. Un peu d'allongement de durée de vie des batteries ainsi qu'une dose de production décarbonée de celles-ci ont été également retenues dans cette ambiance haute qui se veut donc optimiste.

Pour les avions, il est également tenu compte d'un effet de réduction de la vapeur d'eau par inflexion de trajectoire, à hauteur de 60 % en ambiance technologique haute.

L'écart constaté reste donc à ce stade inexpliqué. Peut-être y a-t-il quelques leviers supplémentaires de décarbonation des technologies de motorisation qui seraient activés si on en venait à un prix implicite du carbone dans la zone des 20 000 à 30 000 euros la tonne de CO₂ ? Mais on ne voit pas bien lesquelles à ce stade.

L'autre hypothèse serait que les modèles de type IAM représentent les transports de manière trop sommaire et n'aient pas pris en compte l'ensemble des contraintes qui pèsent sur la décarbonation de ce secteur.

Le secteur des transports pèse plus de 30 % de l'ensemble des émissions de GES en France, et davantage encore en tenant compte des transports internationaux, et sa part est en croissance tendancielle significative, ce qui ne permet pas de le considérer comme un secteur marginal, qui serait un « price taker » de la valeur du carbone, mais bien comme un

²⁷ Deutsche Energie Agentur

« price maker » qu'on ne peut donc pas négliger.

Le problème du risque à examiner

Pour résumer, on se trouve face à une étude sectorielle assez détaillée qui amène sous certaines hypothèses certes non garanties la possibilité d'une valeur d'action carbone aux alentours de l'ordre de 25 000 €/tCO₂eq en 2060. Le pire n'est pas certain, mais on ne peut pas exclure qu'il y ait un risque que cette estimation se matérialise.

S'il n'y avait pas de problèmes de délais, de risques d'irréversibilités, une approche proportionnée pourrait consister à prendre des mesures correspondant à une valeur d'action carbone progressant au taux d'actualisation, et atteignant cette cible. Le taux d'actualisation pourrait se situer au-dessus du taux sans risque de long terme, majoré d'une prime liée à l'incertitude.

Si on était complètement sûr que la valeur adéquate de l'action carbone (VAC) se situe à environ 25 000 euros/tCO₂ en 2060, on pourrait considérer que la trajectoire proportionnée de cette valeur doit mener à ce prix à cet horizon. Puis on pourrait en déduire une chronique de cette valeur en supposant qu'elle doit croître au niveau du taux d'actualisation.

Pour déterminer le taux d'actualisation, une première approche pourrait consister à retenir le taux d'intérêt réel d'équilibre, *a priori* proche du taux de croissance dans le monde, proche de 3 % par an.

Au taux de 3 % par an retenu par la revue de littérature ci-dessus, on aurait ainsi une trajectoire avec les paliers suivants :

7 700 €/tCO₂ en 2020
13 800 €/tCO₂eq en 2040
25 000 €/tCO₂eq en 2060

Une première approche simplifiée pour tenir compte d'une incertitude plus importante pourrait consister à majorer le taux d'actualisation d'une prime de risque. On aurait alors, par exemple avec 4,5 % par an, taux d'actualisation retenu dans le rapport Alain Quinet 2, les niveaux suivants pour la VAC :

4 300 €/tCO₂eq en 2020
10 400 €/tCO₂eq en 2040
25 000 €/tCO₂eq en 2060

De plus, le niveau en question correspond à la meilleure hypothèse technologique. Dans la situation actuelle, la VAC n'est pas du tout dans cet ordre de grandeur ; elle atteint environ 45 €/tCO₂eq pour les carburants VL, et encore moins pour d'autres secteurs.

En pratique, cela amène à prendre en considération dès maintenant comme proportionnées des politiques de VAC pas très élevée, probablement au moins celles à deux chiffres, notamment des politiques de technologie comme l'encouragement des véhicules à énergie décarbonée dans les principaux modes. La question en revanche semble être de savoir s'il faudrait dès maintenant aller au-delà et mener des politiques guidées par une valeur d'action carbone plus importante ou pas.

Si on allait au-delà, il y a le risque qu'*in fine*, les évolutions technologiques se passent mieux que prévu, autrement dit qu'on n'ait pas perçu une possible « technologie miracle » qui surviendrait, et qu'on ait de ce fait imposé des mesures disproportionnées.

De l'autre côté, si on restait en deçà, le risque serait qu' *in fine* on n'ait pas de bonne surprise technologique, et qu'il soit trop tard pour prendre des mesures face à un risque de catastrophe qui surviendrait, notamment de franchissement de « point de bascule²⁸ » du fait de mise en œuvre de boucles de rétroaction positive, et ce d'autant plus si ce risque était majeur et que l'enclenchement de la catastrophe serait alors peut-être irréversible.

À titre d'illustration, l'étude mentionnée ci-dessus modélise les températures selon deux scénarios : dans le scénario 1, la neutralité GES serait atteinte en 2100, et dès 2020 dans le scénario hypothétique 2. Dans ce dernier scénario, d'après ce modèle, les boucles de rétroaction déclenchées maintiennent une hausse de température et l'élévation du niveau de la mer, certes à un moindre degré que dans le scénario 1, mais significatif. Le modèle est cependant très simplifié et demanderait à être confirmé par des modèles plus complets permettant de mieux situer le niveau d'éventuels points de bascule, mais il illustre bien qualitativement la nature du risque de franchissement de point de bascule.

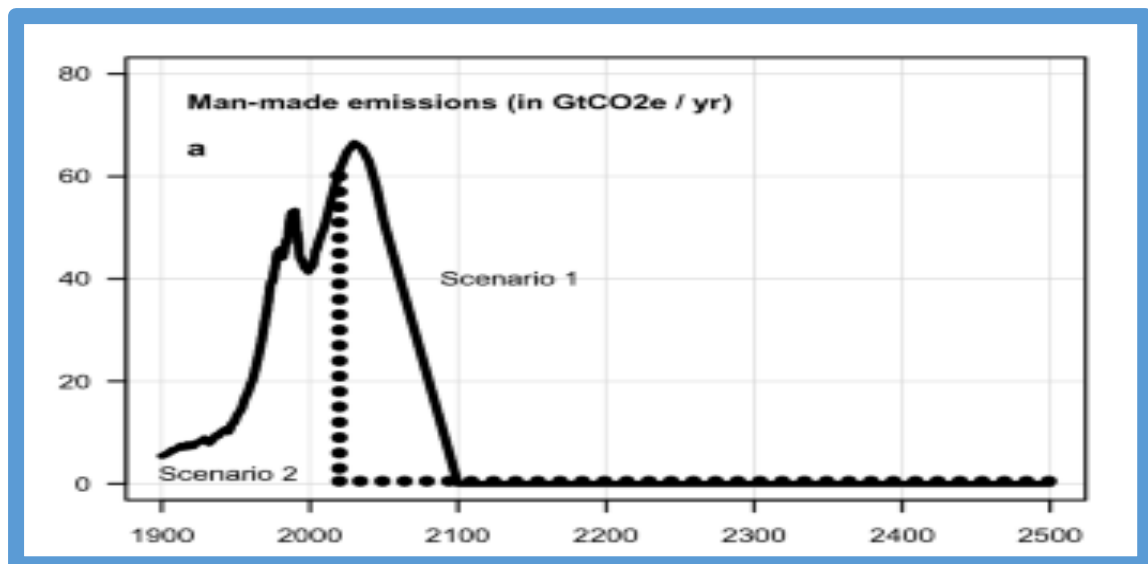


Illustration 18 : Deux scénarios contrastés d'évolution des émissions anthropiques d'ici 2500. Le scénario 2 correspond à un freinage brutal des émissions susceptible de devenir proportionné en cas de découverte de point de bascule proche. Source : Escimo

²⁸À noter une étude récente selon un modèle simplifié Escimo de Randers et al, qui indiquerait que le point de bascule aurait peut-être déjà été franchi vers 1970. Le modèle est cependant assez simplifié et demanderait à être confirmé par des modèles plus complets. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-75481-z>

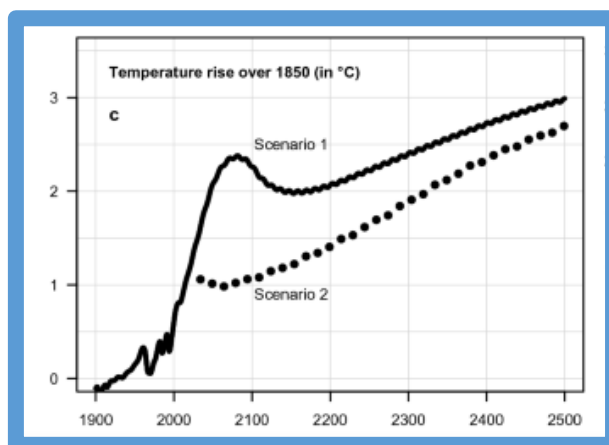


Illustration 19 : Evolution des températures dans ces deux scénarios d'ici 2500. Source : Escimo

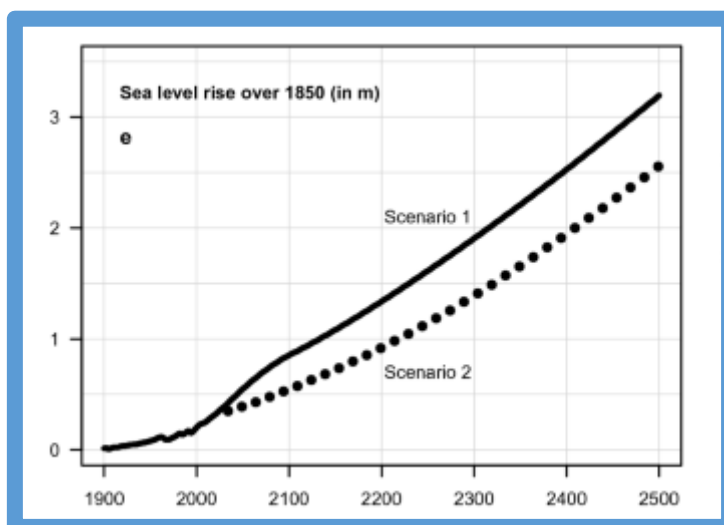


Illustration 20 : Evolution de l'élévation du niveau de la mer dans ces deux scénarios d'ici 2500. Source : Escimo

Il y a donc deux écueils entre lesquels il convient de naviguer au mieux.

Il serait dans ce contexte utile d'essayer de voir si une stratégie commençant avec des mesures à valeur d'action carbone (VAC) relativement basse, mais avec une acquisition d'information « en cours de route » sur la gravité du problème écologique susceptible d'être rencontré, et au cas où le risque se révélerait comme important, d'élever fortement la valeur d'action carbone (VAC) vers les niveaux proportionnés aux enjeux.

On voit qu'une telle stratégie pourrait probablement ne pas poser de problème de principe s'il n'y avait pas d'inertie avec des durées longues des effets des mesures envisageables, ni d'irréversibilités majeures dans les dommages encourus. Dans le cas contraire, la pertinence d'une telle stratégie ne va pas de soi, car il y a le risque de franchir un seuil d'irréversibilité des dommages (par exemple l'apparition de boucles de rétroaction positives climatiques) avant de s'en apercevoir et de disposer du temps nécessaire pour prendre des mesures restrictives.

Ce risque est majoré en cas d'inertie du système, car si on s'apercevait d'un fort risque d'entrée dans une situation irréversible (franchissement de point de bascule), plus il faut

de temps pour qu'un paquet de mesures donne son effet, et plus il y a un risque de dépasser ce moment de basculement vers l'irréversibilité.

Un modèle de type Monte-Carlo pourrait illustrer les parcours possibles et les risques associés.

On suppose que dans les années 2020 et 2030 on mènerait une politique de motorisation décarbonée, mais sans chercher à réduire significativement les trafics ni agir significativement sur l'aménagement.

En 2040, on observe la gravité du changement climatique, que pourrait mesurer la valeur d'action carbone estimée à ce moment-là, et si elle dépasse un seuil, on engagerait une politique de modération forte des déplacements et de maîtrise forte de l'aménagement, ou pas dans le cas contraire.

On en déduit les émissions en 2060, puis on observe en 2060 la valeur d'action carbone à nouveau et on obtient ainsi le coût des dommages.

On propose ci-dessous une esquisse de description plus complète de principe des arbres de décision et d'observation et de valorisation, qui permettrait de simuler le processus et ces risques.

Première tentative de mise en œuvre de la théorie des options réelles

On cherche ici à mettre en œuvre la théorie des options réelles pour affiner les valeurs d'option conférées par le développement d'une technologie limitant les émissions de gaz à effet de serre ou la mise en œuvre d'une politique de sobriété des mobilités.

On considère que la trajectoire de cette valeur d'action carbone (VAC) n'est pas connue complètement et est entachée d'un aléa. Développer une technologie, prendre des mesures de précaution ou des mesures de sobriété des mobilités confère face à cet aléa une valeur assurantielle contre la survenance des cas les plus graves.

On cherchera dans quelques cas à estimer cette valeur assurantielle brute, dans divers contextes.

Le principe de calcul est le suivant :

- la valeur d'action carbone VAC est supposée parcourir un parcours comportant des aléas à partir de la date t_0 où elle prend la valeur S_0 . On note le taux sans risque r . On examine la situation à un horizon ultérieur T années plus tard, donc situé à l'année t_0+T . La volatilité annuelle de la VAC est nommée σ , et le processus est supposé, pour simplifier le modèle en première approche, correspondre aux hypothèses de log-normalité permettant d'appliquer Black and Scholes ;
- on suppose qu'à t_0 on puisse engager (ou pas) un développement technologique. K est le coût de ce développement technologique. À l'horizon t_0+T , si la VAC vaut $S(t_0+T)$, la technologie rapporte $\max(S(t_0+T)-K ; 0)$ par $t\text{CO}_2\text{eq}$;
- autrement dit si $S(t_0+T) > K$, *i.e.* si la VAC est suffisamment élevée, la technologie

apporte par tonne de CO₂eq une valeur $S(t_0+T)-K$; et dans le cas contraire, autrement dit une VAC faible à t_0+T , elle ne rapporte rien (elle ne sert à rien); la valeur du choix technologique s'apparente ainsi à un call de valeur C par tCO₂eq;

- si on suppose que à t_0+T , il y a n tonnes de CO₂ écludables par cette technologie, il semble raisonnable de développer la technologie si son coût de développement ne dépasse pas $n \cdot C$.

La formule de Black-Scholes permet de calculer la valeur théorique d'une option européenne à partir des cinq données suivantes :

- S_0 la valeur actuelle de l'action sous-jacente,
- T le temps qu'il reste à l'option avant son échéance (exprimé en années),
- K le prix d'exercice fixé par l'option,
- r le taux d'intérêt sans risque,
- σ la volatilité du prix de l'action.

Le prix théorique d'une option d'achat, qui donne le droit mais pas l'obligation d'acheter l'actif S à la valeur K à la date T , est caractérisé par son payoff : $(S_T - K)^+ = \max(S_T - K; 0)$

Il est donné par l'espérance sous probabilité risque neutre du payoff terminal actualisé

$$C = \mathbb{E}(\text{Payoff} \times e^{-rT}),$$

soit la formule de Black-Scholes :

$$C(S_0, K, r, T, \sigma) = S_0 \mathcal{N}(d_1) - K e^{-rT} \mathcal{N}(d_2)$$

De même, le prix théorique d'une option de vente, de payoff $(K - S_T)^+ = \max(K - S_T; 0)$ est donné par :

$$P(S_0, K, r, T, \sigma) = -S_0 \mathcal{N}(-d_1) + K e^{-rT} \mathcal{N}(-d_2)$$

avec

- \mathcal{N} la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite $\mathcal{N}(0, 1)$, c'est-à-dire $\mathcal{N}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} du$
- $d_1 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left[\ln\left(\frac{S_0}{K}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)T \right]$
- $d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T}$

L'application numérique est effectuée sur la base du logiciel suivant.

https://excelatfinance.com/xlf/black_scholes.php

On trouvera ci-dessous quelques premières tentatives d'application numérique pour :

- des options consistant à lancer un développement technologique ;
- des options consistant à mener une politique de sobriété des mobilités.

Leur valeur brute est évaluée, qui serait à comparer à leurs coûts.

Dans chaque cas, deux trajectoires de valeur d'action carbone (VAC) la plus probable sont testées comme éléments de contexte, l'une issue de la revue de littérature mentionnée ci-dessus, et l'autre issue de la chronique issue du rapport Alain Quinet 2. Une troisième pourrait être tentée également avec une chronique de VAC encore plus élevée.

Une volatilité (sigma) de la VAC est introduite, issue de la dispersion des valeurs obtenue

en % dans la revue de littérature, avec une variante avec une volatilité (sigma) double.

La valeur d'option esquissée se situe, en fixant d'autres éléments de contexte, comme la valeur assurantielle brute contre un dépassement par la VAC de sa valeur de référence de sa chronique en fin d'horizon. En d'autres termes, la valeur d'option est estimée par convention « à la monnaie », et il n'y a donc pas de valeur intrinsèque dans ce cas. C'est en première approche cette valeur d'option qui permet d'intégrer l'ampleur des incertitudes dans la décision optimale.

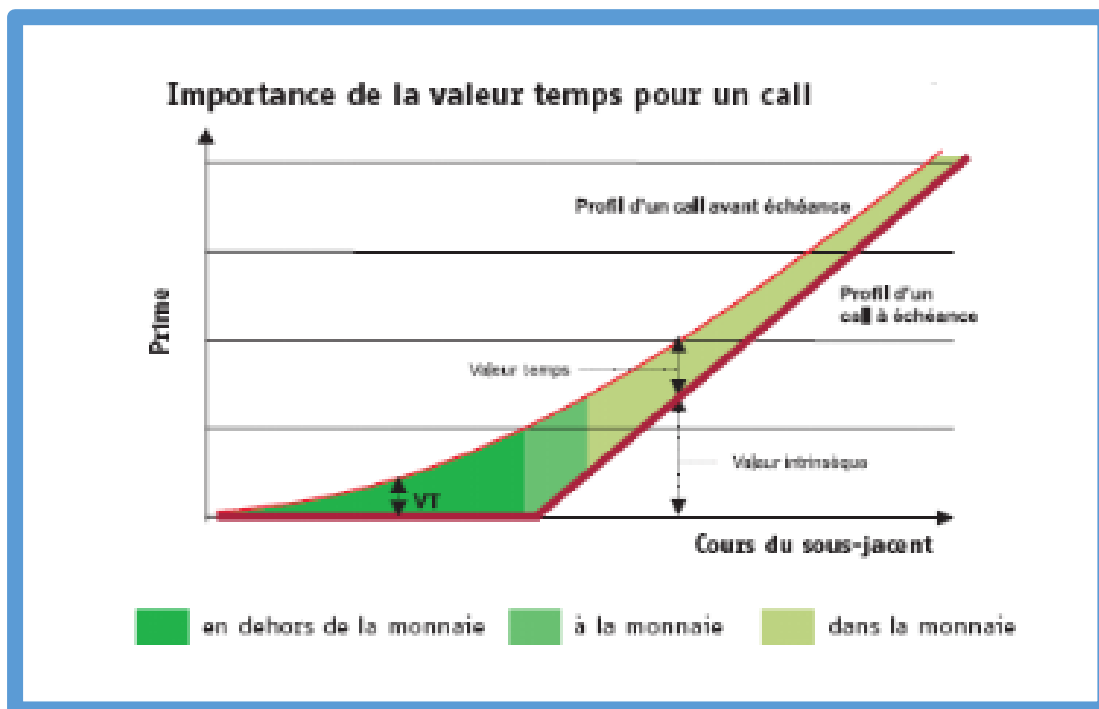


Illustration 21 : Variation de la valeur temps d'une option d'achat (Call). La valeur temps est donnée par l'épaisseur entre les courbes supérieures (valeur du call avant échéance) et inférieures (valeur dite intrinsèque, à l'échéance). Source : « mémoire on line »

Valeurs assurantielles brutes (milliards d'euros)

Les tableaux ci-dessous récapitulent les valeurs assurantielles obtenues dans divers contextes, le détail des hypothèses étant fourni ci-dessous dans les fiches de calcul.

Développement avion H₂ (Part France) €/CO₂eq

	Chronique VAC basse	Chronique VAC moyenne (AQ2)	Chronique VAC haute
Volatilité simple	10	26	nc
Volatilité double	18	48	nc

NB : dans un contexte de contrainte de disponibilité des agro-carburants (50 %) Sur 35 ans d'émissions (1 génération d'avions) ; un seul développement ; quote-part France de 3,3 % d'un effort de développement mondial

Accompagnement développement de l'usage du véhicule électrique (France) €/tCO₂eq

	Chronique VAC basse	Chronique VAC moyenne (AQ2)	Chronique VAC haute
Volatilité simple	15	41	nc
Volatilité double	29	72	nc

NB : dans un contexte contraint sur les agro-carburants et les autres alternatives décarbonées

Sur 20 ans d'émissions (1 génération de voitures)

Politique de sobriété moyenne des mobilités voyageurs (trajectoire sur 40 ans à compter de 2020) €/tCO₂eq

	Chronique VAC basse	Chronique VAC moyenne (AQ2)	Chronique VAC haute
Volatilité simple	166	449	nc
Volatilité double	319	783	nc

NB : sur 350 ans d'émissions de CO₂ (2 demi-vies); les valeurs des efforts sur une même durée seraient à prendre en compte pour estimer une valeur nette

Politique de sobriété renforcée des mobilités (trajectoire sur 20 ans au-delà de 2040, en sus de politique de sobriété moyenne des mobilités voyageurs) €/tCO₂eq

	Chronique VAC basse	Chronique VAC moyenne (AQ2)	Chronique VAC haute
Volatilité simple	81	442	2991
Volatilité double	156	1151	4401
Volatilité quadruple	nc	nc	7082

Nb : sur 350 ans d'émissions de CO₂ (2 demi-vies); les valeurs des efforts sur une même durée seraient à prendre en compte pour estimer une valeur nette.

À ce stade, malgré les très fortes incertitudes, il semble que :

- les valeurs assurantielles croissent avec la volatilité : plus l'avenir est incertain, plus l'assurance apporte de la valeur ;
- les valeurs assurantielles sont plus élevées si on part de l'hypothèse d'une chronique plus forte de valeur d'action carbone ; plus on peut penser que le risque est grave, plus il semble intéressant de chercher à s'en protéger ;
- il s'agit ici de valeurs brutes ; pour obtenir une valeur nette des coûts, il conviendrait d'enlever la valeur des efforts à accomplir (par exemple coûts de R et D) ;
- en première approche, pour des développements technologiques, il s'agit des frais de recherche et développement qui pourraient ne pas être recouverts en cas d'échec ;
- pour les politiques de sobriété des mobilités, il s'agit des pertes de surplus liées aux politiques menées (taxe carbone, et/ou mesures quantitatives ou autres équivalentes en première approche).

L'étape suivante consisterait à définir un arbre de décision comportant une possibilité d'implémenter en amont (entre 2020 et 2030 voire 2040) des mesures de précaution, pas trop coûteuses, mais permettant à une politique de sobriété renforcée des mobilités, si elle devait être mise en place, d'être la moins inacceptable possible ainsi que la plus

efficace possible.

Fiches de calculs des valeurs d'option

Exemple 1 d'application numérique : Développement d'un avion à hydrogène

On se situe en 2020, avec le choix de développer ou pas une technologie de rupture comme l'avion à hydrogène, susceptible de réduire les émissions de GES du transport aérien.

On suppose que l'aviation mondiale émettra n_{ref} tCO₂eq en 2060 en l'absence de l'avion à hydrogène (mais probablement avec un taux non nul d'incorporation d'agrocaburants), mais que si l'avion à hydrogène est développé il n'y aura plus que n_{proj} tCO₂eq en 2060. Le gain annuel en 2060 est donc de $-(n_{proj} - n_{ref})$ tCO₂eq par an en 2060.

a) Valorisation basse

S0 en 2020 vaut 38 €/tCO₂eq en reprenant la revue de littérature, $r=3\%$, avec une volatilité annuelle σ .

D'ici 2060, $T=40$ ans.

Si l'incertitude correspond à 2 écarts types en 40 ans, $S_0 + 2 \cdot \text{écart-type} \cdot \text{racine}(T) = 2 \cdot S_0$

Écart-type = $(2 \cdot 38 - 38) / 2 / \text{racine}(40) = 3$ et $\sigma = 3/38 = 7,9\%$

Si par exemple la technologie permet de se prémunir contre les conséquences d'une valeur d'action carbone dépassant 125 €/tCO₂eq, soit la valeur prévue par une hausse de 3 % par an sur 40 ans, la valeur du call C ressort à 7,64 €/tCO₂eq économisée.

En référence, l'OACI indique environ 2000 MtCO₂/an en 2050, soit 2700 MtCO₂ en 2060 hors effet d'une incorporation d'agros carburants. En supposant par exemple 50 % d'incorporation, il resterait $n_{ref} = 1350$ MtCO₂/an, sans tenir compte des autres GES.

https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg17-23.pdf

Supposons par exemple que l'avion H₂ divise par 5 ces émissions de CO₂ en ACV, sans effet sur les autres GES, l'économie serait de $1350 - 1350/5 = 1080$ MtCO₂/an en 2060.

Le développement technologique évitera les émissions pendant longtemps, on retient par prudence un ordre de grandeur de la durée de vie d'un avion soit environ 35 ans, ou donc $1080 \cdot 35 = 37800$ MtCO₂.

La valeur globale raisonnable du développement lié à la garantie contre le risque d'un dépassement de la VAC du seuil de 125 €/tCO₂eq en 2060 serait ainsi de $7,64 \cdot 37800 = 290$ milliards d'euros.

Au prorata du PIB, celui de la France étant de l'ordre de 3,3 % du PIB mondial, la quote-part reviendrait à 9,5 milliards d'euros.

On peut estimer diverses sensibilités :

Il y a celle où la VAC serait globalement plus élevée. La valeur du développement croit alors.

Si la volatilité était deux fois plus forte, au lieu de $C=7,64$ on aurait $C=14,65$ soit 556 milliards au niveau mondial, dont une quote-part France au prorata du PIB à 18,3 milliards d'euros.

Plus l'avenir est incertain sur le plan de la valeur d'action carbone, et plus la valeur assurantielle du développement est intéressante, y compris à même trajectoire de référence de la valeur d'action carbone.

En revanche si on souhaite se protéger contre un dépassement de la VAC à un seuil plus élevé, la valeur assurantielle baisse.

On est ici dans un contexte où les contraintes quantitatives ne permettraient pas plus de 50 % d'incorporation d'agro-carburants. Plus ce taux pourrait être élevé, moins le développement en question serait intéressant.

Plus le développement de cette technologie de rupture pourrait ne pas réussir, et moins elle serait intéressante.

b) Valorisation avec la chronique du rapport Alain Quinet 2

On retient ici $r=6,8\%$ correspondant à un taux de croissance annuel constant de la valeur d'action carbone moyenne (le taux affiché de $4,5\%$ n'est utilisé qu'à compter de 2040) le rapport Alain Quinet 2, menant à $1\,200\text{ €/tCO}_2$ en 2060.

S_0 en 2020 se situe ainsi à 87 €/tCO_2 . $T=40$ ans. On considère une volatilité annuelle de $7,9\%$. Et un prix d'exercice $K=1\,200\text{ €/tCO}_2\text{eq}$ en 2060 au niveau moyen de la chronique. On a alors $C=20,6\text{ €/tCO}_2\text{eq}$.

La valeur globale raisonnable du développement considéré liée à la garantie contre le risque d'un dépassement de la VAC du seuil de $1\,200\text{ €/tCO}_2\text{eq}$ en 2060 serait ainsi de $20,6 \times 37800 = 779$ milliards d'euros.

Au prorata du PIB, celui de la France étant de l'ordre de $3,3\%$ du PIB mondial, la quote-part reviendrait à 26 milliards d'euros.

Si on double la volatilité à $15,8\%$, on obtient $C=35,9\text{ €/tCO}_2\text{eq}$, soit une valeur de 1357 milliards d'euros et une quote-part France de 48 milliards d'euros.

c) Bilan

Un développement d'avion H_2 , s'il réussissait, apporterait ainsi une valeur assurantielle dans un monde avec une valeur d'action carbone qui se révélerait élevée combinée avec des quantités d'agro-carburants limitées et une croissance tendancielle du trafic et de la productivité énergétique des moteurs.

L'application numérique n'est pas aisée à paramétrer, cela dit elle semble enseigner que même avec des valeurs très raisonnables de l'action carbone, un tel développement, sauf à considérer qu'il n'aurait que très peu de chances de réussir, ou bien qu'il y aurait très peu de risques de ne pas disposer d'assez d'agro-carburants, pourrait apporter une valeur assurantielle collective assez considérable se situant en centaines de milliards d'euros au plan mondial, à comparer avec les risques à prendre liés à un lancement d'un développement qui raterait et ne pourrait être recouvert lors de la commercialisation, et dont le coût semble borné par celui du développement technologique.

Exemple 2 d'application numérique: Accompagnement de la diffusion de la voiture à énergie décarbonée

Ici, on ne se situe plus dans une technologie de rupture, mais d'efforts d'accompagnement pour qu'elle se diffuse largement. Il peut par exemple s'agir de financer notamment un réseau de bornes de recharge nombreuses et rapides destiné à rassurer les utilisateurs, notamment mais pas seulement pour les usages interurbains, ainsi qu'une dose d'anticipation de l'équipement en bornes de recharge des immeubles collectifs un peu en avance de l'équipement en voitures électriques des résidents.

Par exemple, on va regarder la valeur assurantielle d'une politique permettant de faire passer de 30 % à 100 % le taux de véhicules à énergie décarbonée.

On suppose qu'en ACV la technologie permet de diviser par 4 les émissions de CO₂. En référence en 2060, on se situe autour de 190 MtCO₂/an. On compte 20 ans d'émissions, soit une économie de $\frac{3}{4} \cdot (1-0,3) \cdot 20 \cdot 190 = 1995$ MtCO₂.

a) Valorisation basse

Si on part dans le cas de base de $S_0 = 38$ €/tCO₂eq en 2020, $r = 3\%$, $T = 40$ ans, volatilité = 7,9 %, un seuil à $K = 125$ €/tCO₂eq en 2060 (cf. ci-dessus), le call unitaire vaut 7,64 €/tCO₂eq soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de $1995 \cdot 7,64 = 15$ milliards d'euros. Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers 15,8 %, alors $C = 14,6$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à $1995 \cdot 14,6 = 29$ milliards d'euros.

b) Valorisation moyenne avec la chronique Alain Quinet 2

On a alors $S_0 = 87$ €/tCO₂eq en 2020, $r = 6,8\%$, volatilité = 7,9 % $K = 1200$ €/tCO₂eq $T = 40$ ans, $C = 20,6$ €/tCO₂eq, soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de $1995 \cdot 20,6 = 41$ milliards d'euros.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers 15,8 %, alors $C = 35,9$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à $1995 \cdot 35,9 = 72$ milliards d'euros.

c) Bilan

Une politique vigoureuse d'accompagnement du développement de la voiture décarbonée, apporterait ainsi une valeur assurantielle.

L'application numérique n'est pas aisée à paramétrer, cela dit elle semble enseigner que même avec des valeurs très raisonnables de l'action carbone, un tel développement sauf à considérer qu'il n'aurait que très peu de chances de réussir, pourrait apporter une valeur assurantielle collective assez considérable se situant en dizaines ou centaines de milliards d'euros au plan mondial, à comparer avec les risques à prendre liés à un échec éventuel d'une telle politique dont le coût resterait borné par les coûts d'investissement échoués en première approche.

Exemple 3 : Politique de sobriété moyenne (voyageurs) à compter de 2020 (volet terrestre, volet aérien)

Cette politique consiste à mener une politique de sobriété moyenne à compter de 2020 au lieu d'une politique individualiste des mobilités (voir fiche voyageurs). Elle est ici évaluée en ambiance technologique moyenne.

En terrestre en 2060, les émissions de GES sont de 36 MtCO₂eq/an au lieu de 96 MtCO₂eq/an en ambiance technologique moyenne, soit une différence de 60 MtCO₂eq/an.

En aérien en 2060, les émissions de GES sont de 78 MtCO₂eq/an au lieu de 86 MtCO₂eq/an en ambiance technologique moyenne, soit une différence de 8 MtCO₂eq/an.

Se pose ensuite la question de la durée de ces émissions éludées à prendre en compte. On peut dans un premier temps retenir une durée type de maintien du CO₂ dans l'atmosphère, soit 350 ans pour le terrestre. Pour l'aérien une durée de 100 ans seulement est retenue compte du mix avec la vapeur d'eau qui disparaît plus rapidement.

a) Valorisation basse

Si on part dans le cas de base de $S_0=38$ €/tCO₂eq en 2020, $r=3$ %, $T=40$ ans, volatilité=7,9 %, un seuil à $K=125$ €/tCO₂eq en 2060 (cf. ci-dessus), le call unitaire vaut 7,64 €/tCO₂eq soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de 166 milliards d'euros, dont $60*350*7,64=160$ milliards d'euros en terrestre et $8*100*7,64=6$ milliards d'euros en aérien.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers 15,8 %, alors $C=14,6$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 319 milliards d'euros, dont $60*350*14,6=307$ milliards d'euros en terrestre et $8*100*14,6=12$ milliards d'euros en aérien.

b) Valorisation moyenne avec la chronique Alain Quinet 2

On a alors $S_0=87$ €/tCO₂eq en 2020, $r=6,8$ %, volatilité=7,9 % $K=1200$ €/tCO₂eq $T=40$ ans $C=20,6$ €/tCO₂eq, soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de 449 milliards d'euros, dont $60*350*20,6=433$ milliards d'euros en terrestre et $8*100*20,6=16$ milliards d'euros en aérien.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers 15,8 %, alors $C=35,9$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 783 milliards d'euros, dont $60*350*35,9=754$ milliards d'euros en terrestre et $8*100*35,9=29$ milliards d'euros en aérien.

Exemple 4 : Politique de sobriété renforcée (voyageurs) à compter de 2040 (volet terrestre, volet aérien)

Cette politique consiste à mener une politique de sobriété renforcée à compter de 2040 au lieu d'une politique de sobriété moyenne (voir rapport thématique mobilité des

personnes). Elle est ici évaluée en ambiance technologique haute.

En terrestre en 2060, les émissions de GES sont de 11 MtCO₂eq/an au lieu de 28 MtCO₂eq/an en ambiance technologique haute, soit une différence de 17 MtCO₂eq/an.

En aérien en 2060, les émissions de GES sont de 5 MtCO₂eq/an au lieu de 27 MtCO₂eq/an en ambiance technologique haute, soit une différence de 22 MtCO₂eq/an.

Se pose ensuite la question de la durée de ces émissions éludées à prendre en compte. On peut dans un premier temps retenir une durée type de maintien du CO₂ dans l'atmosphère, soit 350 ans pour le terrestre. Pour l'aérien une durée de 100 ans seulement est retenue compte du mix avec la vapeur d'eau qui disparaît plus rapidement.

a) Valorisation basse

Si on part dans le cas de base de $S_0 = 69$ €/tCO₂eq en 2040, $r = 3\%$, $T = 20$ ans, volatilité = $7,9\%$, un seuil à $K = 125$ €/tCO₂eq en 2060 (cf. ci-dessus), le *call* unitaire vaut $9,85$ €/tCO₂eq soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de 81 milliards d'euros, dont $17 \cdot 350 \cdot 9,85 = 59$ milliards d'euros en terrestre et $22 \cdot 100 \cdot 9,85 = 22$ milliards d'euros en aérien.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers $15,8\%$, alors $C = 19,2$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 156 milliards d'euros, dont $17 \cdot 350 \cdot 19,2 = 114$ milliards d'euros en terrestre et $22 \cdot 100 \cdot 19,2 = 42$ milliards d'euros en aérien.

b) Valorisation moyenne avec la chronique Alain Quinet 2

On a alors $S_0 = 500$ €/tCO₂eq en 2040, $r = 4,5\%$, volatilité = $7,9\%$, $K = 1200$ €/tCO₂eq et $T = 20$ ans.

$C = 74,3$ €/tCO₂eq, soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de 605 milliards d'euros, dont $17 \cdot 350 \cdot 74,3 = 442$ milliards d'euros en terrestre et $22 \cdot 100 \cdot 74,3 = 163$ milliards d'euros en aérien.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers $15,8\%$, alors $C = 141,2$ €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 1151 milliards d'euros, dont $17 \cdot 350 \cdot 141,2 = 840$ milliards d'euros en terrestre et $22 \cdot 100 \cdot 141,2 = 311$ milliards d'euros en aérien.

c) Valorisation avec une chronique haute

On retient ici une chronique aboutissant à $25\,000$ €/tCO₂eq en 2060.

Il y a un sujet de déterminer à partir de quel niveau partir en 2040. Comme on se situe dans une chronique comportant une forte incertitude, il semble raisonnable d'imaginer un taux de croissance assez élevé entre 2040 et 2060, par exemple $r = 15\%$, ce qui donne $S_0 = 1528$ €/tCO₂eq en 2040. ($= 25000 / (1,15^{20})$). Ceci correspond à une situation où la gravité du problème combinée avec un constat de difficultés de mise en place de solutions ait déjà commencé en 2040 et continue de s'aggraver par la suite d'ici 2060.

On garde une volatilité de 7,9 %, et l'horizon T est de 20 ans entre 2040 et 2060.
K est retenu « à la monnaie » donc à 25 000 €/tCO₂eq en 2060.
C= 367 €/tCO₂eq, soit environ une valeur assurantielle globale au niveau France de 2991 milliards d'euros, dont 17*350*367= 2184 milliards d'euros en terrestre et 22*100*367=807 milliards d'euros en aérien.

Plus l'avenir est incertain (sigma élevé), et plus la valeur assurantielle est forte.

Si la volatilité double vers 15,8 %, alors C= 540 €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 4401 milliards d'euros, dont 17*350*540=3213 milliards d'euros en terrestre et 22*100*540= 1188 milliards d'euros en aérien.

Dans un monde aussi incertain, on peut tester une volatilité encore plus forte, par exemple un deuxième doublement soit 31,6 %.

On a alors C= 869 €/tCO₂eq et la valeur assurantielle globale au niveau France passe à 7082 milliards d'euros, dont 17*350*869= 5171 milliards d'euros en terrestre et 22*100*869= 1912 milliards d'euros en aérien.

Proposition d'affinement des arbres de choix

Les éléments ci-dessous esquissent des arbres de choix qui pourraient être décrits pour mettre en œuvre la théorie des options réelles avec plusieurs choix successifs.

Terrestres voyageurs

2020

Choix de lancer ou pas une politique d'accompagnement fort du VE

Choix de lancer ou pas une politique de sobriété moyenne des mobilités terrestres voyageurs

Choix de lancer ou pas une politique renforcée d'aménagement

Choix de prendre des mesures de précaution pour lancer en 2040 si besoin une politique de sobriété renforcée des mobilités

2040

Affinement de la proximité des points de basculement climatique

Si pas politique accompagnement fort VE à l'étape précédente, choix ou pas de la lancer

Si politique accompagnement fort VE à l'étape précédente, choix ou pas de renforcement

Si politique sobriété moyenne déjà lancée, et mesures de précaution prises, choix de lancer ou pas une politique de sobriété renforcée des mobilités terrestres voyageurs

Choix de continuer ou pas une politique renforcée d'aménagement

2060

Nouvelle mesure de proximité des points de basculement climatique

Bilan des émissions

Pay off catastrophique en cas de dépassement du point de basculement climatique

Aérien

2020

Choix de lancer ou pas une politique développement avion H₂

Choix de lancer ou pas une politique de sobriété moyenne des mobilités aériennes voyageurs

Choix de prendre des mesures de précaution pour lancer en 2040 si besoin une politique de sobriété renforcée des mobilités aériennes

2040

Affinement de la proximité des points de basculement climatique

Si pas politique développement avion H₂ à l'étape précédente, choix ou pas de la lancer

Si politique sobriété moyenne aérienne déjà lancée, et mesures de précaution prises, choix de lancer ou pas une politique de sobriété renforcée des mobilités aériennes voyageurs

2060

Nouvelle mesure de proximité des points de basculement climatique

Bilan des émissions

Pay off catastrophique en cas de dépassement du point de basculement climatique

Jumelage possible des *pay-off* voyageurs terrestre et aérien. (puis avec ceux des marchandises)

Annexe 5 : Première évaluation par la méthode de Monte-Carlo d'une politique flexible de gestion des incertitudes liées au dérèglement climatique dans les mobilités

La présente annexe donne une première esquisse d'évaluation d'une politique flexible de gestion à grande échelle des mobilités face aux incertitudes sur le risque climatique.

Si le dérèglement climatique ne fait plus doute, il reste inévitablement de très nombreuses incertitudes à son sujet, notamment sur :

- l'ampleur des dommages, à la fois sur le plan physique (notamment hausse de température en fonction du cumul des GES émis) mais aussi sur le plan économique (lien entre l'impact économique (par exemple en % du PIB) par rapport à la hausse de température, qui peut dépendre aussi de l'ampleur des mesures d'adaptation également ;
- l'ampleur des efforts d'évitement pour limiter les émissions, qu'ils soient monétaires, liés au temps passé ou d'autres natures.

L'analyse effectuée ici se limite au seul secteur des mobilités, dont la maîtrise semble assez déterminante pour le résultat global des politiques climatiques puisqu'il ne s'agit pas d'un secteur marginal (30 % des émissions de GES en France environ au format Secten et potentiellement plus de 50 % si on inclut l'amont, une quote-part des modes internationaux, la diversité des GES et les empreintes véhicules et infrastructures).

L'application numérique a été effectuée pour le scénario neutralité dans la variante où il ne serait pas possible de dépasser une division par plus de 5,2 des gCO₂/voiture particulière-km. De ce fait les mesures de sobriété à mettre en œuvre pour tenir l'objectif de neutralité carbone sont strictes et leurs coûts sociaux-économiques très élevés, par rapport à ce qu'ils pourraient être dans le cas où la division par 8 des gCO₂/VP-km pourrait être atteinte à terme.

Du fait de la limitation à ce seul secteur des mobilités, et à ce stade aux seules mobilités terrestres voyageurs touchant la France, il est effectué l'hypothèse très simplificatrice que les politiques dans les autres secteurs dans tous les pays présentent des coûts d'évitement homothétiques à celles de ce dernier secteur touchant la France.

Il s'agit bien entendu d'une hypothèse très simplificatrice, dans la mesure où les estimations des intensités des dommages par ensembles géographiques peuvent varier significativement d'un ensemble à l'autre, avec des vulnérabilités au dérèglement climatique souvent plus fortes dans les pays émergents. La structure des coûts d'évitement peut aussi être variable selon les ensembles économiques considérés. Toutefois la prise en compte de telles différences supposerait la mise en œuvre de modèles détaillés allant au-delà de l'actuel travail de prospective qui vise essentiellement à repérer des grandes tendances.

À cet effet, un premier ensemble vise à décrire pour chacun des scénarios de prospective des mobilités 2040 et 2060 de manière statique une estimation des coûts des dommages et des coûts d'évitement.

Dans un deuxième temps, il est recherché quelle politique « statique » est optimale au sens

socio-économique, au vu d'un critère de minimisation de la somme des coûts des dommages et des coûts d'évitement à l'intérieur d'un horizon de temps conventionnel.

Puis dans un troisième temps, des tirages au sort sont effectués sur des trajectoires d'aléas représentant le progrès des connaissances au cours des prochaines décennies sur les paramètres clés du système. Est examinée la performance au vu de la minimisation des coûts totaux sur l'horizon retenu (critère énoncé précédemment) d'une règle de décision flexible par rapport à des règles définies *a priori*.

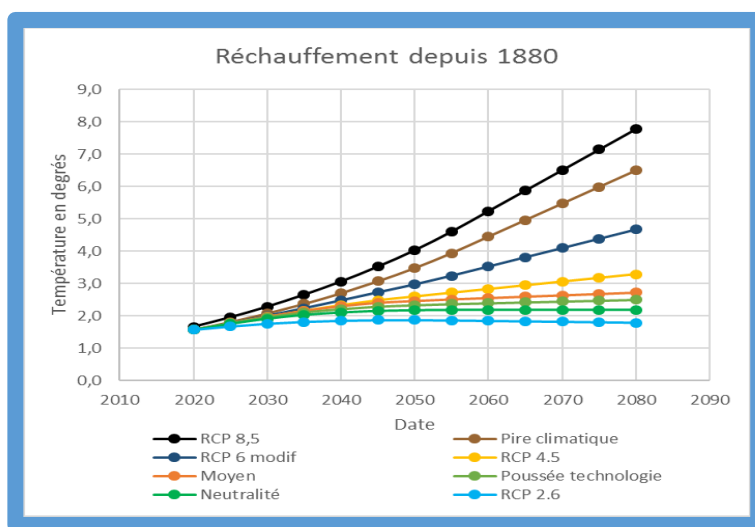
Évaluation des coûts des dommages et des coûts d'évitement pour chaque décennie dans les différents scénarios prospectifs

Les coûts des dommages

L'estimation du coût des dommages passe par les étapes suivantes :

- une estimation des émissions nettes du secteur des transports terrestres de voyageurs en France ;
- puis au *pro rata* des émissions nettes tous secteurs Monde ;
- puis des émissions nettes cumulées tous secteurs Monde ;
- puis des températures ;
- puis des coûts des dommages en termes de % perte de PIB.

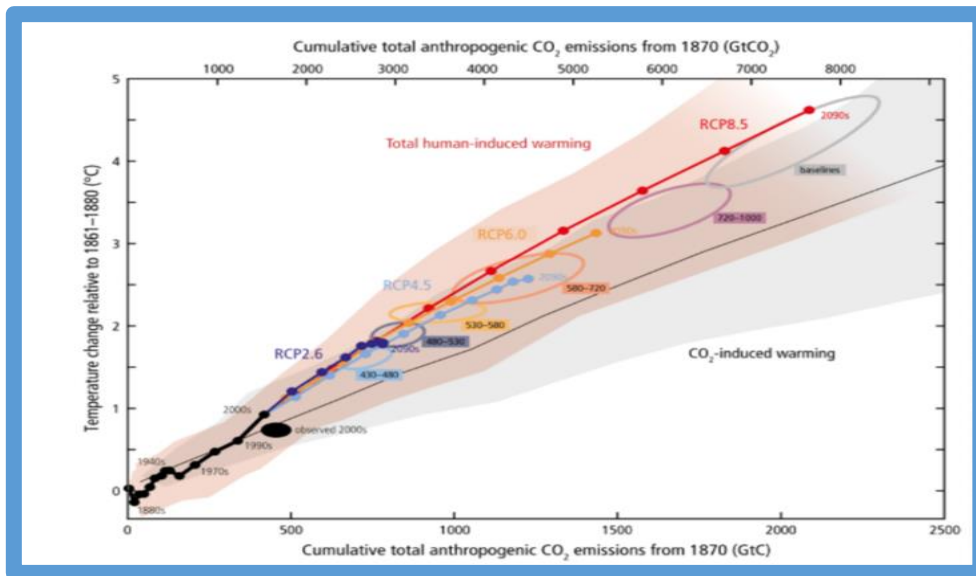
Les scénarios des travaux de prospective peuvent ainsi être comparés sous les hypothèses indiquées ci-dessus aux scénarios RCP du GIEC²⁹ via les émissions cumulées monde obtenues ; on peut ensuite décrire dans chaque scénario les évolutions de température au-delà de l'époque pré-industrielle.



Graphique 1 : Lien entre émissions de GES et hausse des températures (depuis 1880) dans divers scénarios d'ici 2080.
Source : Prospective des transports et mobilités ; CGEDD, France stratégie

29 RCP 8.5 ; RCP 6 ; RCP 4.5. RCP 2.6 ; le scénario RCP ne s'inscrivant pas dans la gamme des autres scénarios, un scénario « RCP 6 modifié » a été construit en interpolant les RCP 4.5 et 8.5

Le lien entre émissions nettes cumulées et hausse des températures est issu de travaux du GIEC.

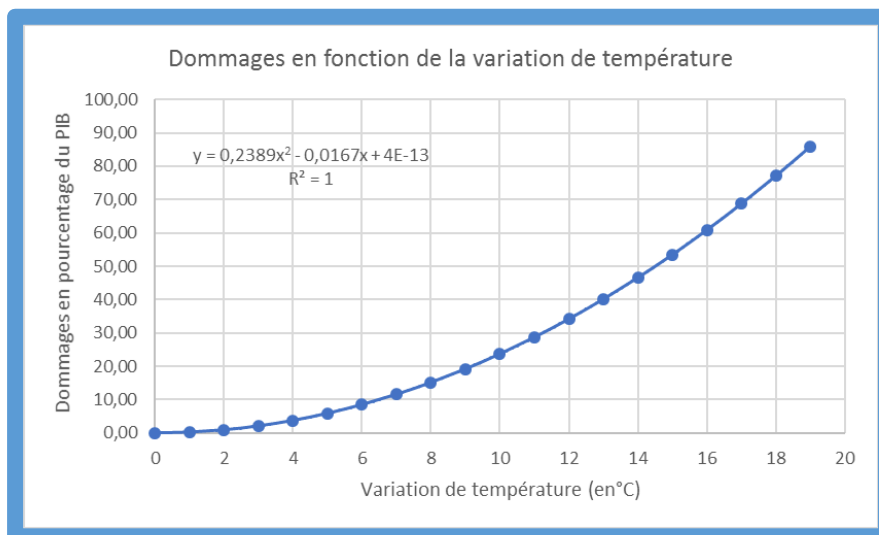


Graphique 2 : Effet des émissions anthropiques cumulées de CO₂ depuis 1870 sur la hausse des températures. Source : GIEC

Le lien entre dommages économiques et hausse de température est issu des travaux de Nordhaus. Cette équation quadratique donne la relation suivante :

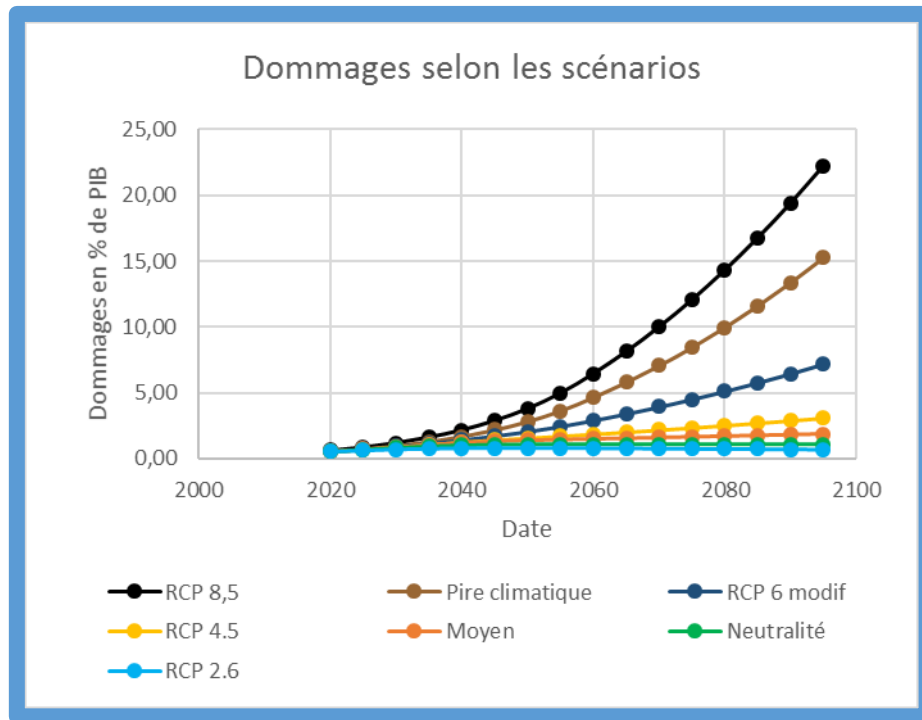
%PIB perdu = $a \cdot (DT)^2 + b \cdot DT$ où DT est la hausse de température par rapport à l'époque pré-industrielle avec $a=0,2369$ et $b=-0,0167$

Elle implique donc qu'à haute température les dommages économiques du degré additionnel sont plus élevés qu'à plus basse température.



Graphique 3 : Coût des dommages (en % du PIB) en fonction de la variation de température. Source : Prospective des transports et mobilités CGEDD, France stratégie d'après Nordhaus

On peut ainsi aboutir à une estimation des coûts annuels de dommages en % de PIB aux différentes années du XXI^{ème} siècle.



Graphique 4 : Coût des dommages (en % du PIB) selon divers scénarios. Source : Prospective des transports et mobilités CGEDD, France stratégie

Les coûts d'évitement

L'estimation des coûts d'évitement est déduite de la précédente note sur les coûts d'évitement à 2060 des différents scénarios dans les transports terrestres de voyageurs. Ils sont décomposés en :

- une part motorisation ;
- une part sobriété hors aménagement ;
- une part sobriété par l'aménagement ;
- une part liée à la production d'émissions négatives.

Le coût d'évitement comprend plusieurs facteurs :

- des surcoûts monétaires (au sens du calcul socio-économique) ;
- des surcoûts liés à des hausse de temps passé, valorisés au moyen d'une valeur du temps.

En additionnant ces deux composantes, on obtient un coût généralisé d'évitement annuel, qui peut être ramené à des % de PIB. Pour passer à des coûts d'évitement tous secteurs monde, la même hypothèse d'homothétie est effectuée.

Cette hypothèse d'homothétie d'une part entre « transports terrestres de voyageurs » et « tous secteurs » et entre France et monde d'autre part est bien entendu une simplification

importante. La croissance tendancielle des émissions dans les transports terrestres de voyageurs constatée dans le passé est supérieure à celle de l'ensemble des secteurs économiques.

À l'inverse, la croissance économique tendancielle est plus élevée dans le monde qu'en France, et donc également celle des trafics et des émissions. Chacun de ces deux effets porte sur environ 2 % par an³⁰, mais en sens inverse l'un de l'autre.

Compte tenu de cet ensemble d'hypothèses les deux approximations semblent donc se compenser en première approche.

Si toutefois la tendance globale des émissions était décalée de x %, celle des émissions cumulées le serait d'autant, et celle du coût des dommages le serait de l'ordre de $2 \cdot x$ % dans la mesure où ce dernier croit en première approche comme le carré de la hausse de température, et donc le carré des émissions cumulées puisque cette dernière lui est proportionnelle. Si le coût d'évitement reste proportionnel aux émissions en première approche, celui-ci serait augmenté de x %. Au total, il s'en suivrait un décalage modéré de l'optimum économique, qui, à ce stade, semble bien plus faible que le décalage entraîné par la combinaison de toutes les autres incertitudes.

De manière schématique :

- dans la politique « pire climatique », 30 % des véhicules sont à terme à énergie décarbonée ; on fait l'hypothèse qu'il s'agit essentiellement de « deuxièmes voitures » n'impliquant pas des temps de charge additionnels (recharge en temps masqué à domicile ou sur le lieu de travail notamment) ; il y a en revanche un surcoût monétaire socio-économique lié au fait que le véhicule est plus onéreux à produire et qu'il convient de produire quelques installations de recharge mais limitées ;
- dans la politique « ambition de base » (« moyen » dans les graphiques), l'ensemble des véhicules sont à terme à énergie décarbonée ; outre les surcoûts monétaires des véhicules et de la production d'installations de recharge plus conséquentes, une grande partie du coût généralisé provient des temps d'attente additionnel par rapport à un plein de carburant en trajet interurbain ;
- dans la politique « poussée de technologie » figurent les coûts de la politique « de référence », plus ceux liés à la fabrication décarbonée du véhicule et de sa batterie (le cas échéant) ;
- dans la politique de « neutralité », pour atteindre l'objectif très contraint d'émissions, il est supposé une politique de covoiturage et de transports collectifs aboutissant à un haut degré de massification ; cette politique a été simulée et optimisée sur trois territoires de densité contrastée ; elle implique toutefois des pertes de temps des voyageurs assez conséquentes du fait des inévitables temps d'attente des véhicules pour en optimiser le remplissage nécessaire à la massification.

30 Pour l'effet croissance monde vs France, si la croissance du monde est de 3 % et celle de la France de 1 %, cela correspond à une différence de l'ordre de 2 % par an ; pour l'effet secteur transports par rapport à du tous secteurs, le passé montre que la part des transports dans les GES augmente : ainsi la figure D3-12 de la CCTN sur la période 1990-2014 donne +10 % sur les GES transports et -20 % sur le tous secteurs, donc 30 % d'écart en 15 ans soit un effet de l'ordre de -2 % par an

Les coûts de production et les quantités d'émissions négatives ont été à ce stade laissées fixes.

La politique de sobriété a été décomposée en une part liée à l'aménagement, avec un effet cumulatif, et une part à effet plus instantané. Cette décomposition est cependant très fragile.

Ces estimations de coûts généralisés d'évitement ont été dans un premier temps effectuées à l'horizon 2060, puis aux horizons intermédiaires. Au-delà de 2060, ces coûts généralisés d'évitement sont supposés constants dans le temps en première approche en % du PIB.

Les politiques peuvent ensuite être pilotées par une variable d'effort, comprenant quatre composantes (motorisation, sobriété hors aménagement, aménagement, émissions négatives), permettant de constituer un *continuum* de politiques et les trajectoires de coûts des dommages et de coûts d'évitement associées.

Les horizons temporels d'évaluation

Trois horizons sont prévus pour l'évaluation des politiques :

- un horizon correspondant à 2060, avec une moyenne de 2020 à 2060 des % de PIB perdus (dommages et évitement) sur la période ;
- un horizon séculaire de 2100, avec une moyenne de 2020 à 2100 des % de PIB perdus (dommages et évitement) sur la période ;
- un horizon multi-séculaire à 2300, consistant à effectuer une moyenne de 2020 à 2300 des % de PIB perdus (dommages et évitement) sur la période, en les supposant constant au-delà de 2100.

Il n'est pas fait usage de taux d'actualisation ni de croissance dans le temps des valeurs d'action carbone ce qui permet d'utiliser un critère d'optimisation relativement simple puisque l'équi-pondération des années simplifie le calcul des bilans des différentes décisions envisageables.

Au-delà des considérations éthiques souvent avancées pour soutenir le choix d'un taux d'actualisation nul, dans le contexte de cette étude prospective, ne pas actualiser les flux économiques et adopter des valeurs d'action carbone constantes revient à supposer une économie stationnaire dans la durée ce qui n'est pas cohérent avec les scénarios étudiés qui supposent des transformations radicales des structures de dépenses et de recettes.

Des versions ultérieures du modèle pourront intégrer ces aspects au prix d'une complexité inaccessible aux échéances fixées pour ce travail.

Les principaux résultats de l'analyse par scénario statique

Les éléments indiqués ci-dessus permettent une première esquisse d'évaluation économique des diverses politiques statiques envisagées. Elles sont qualifiées ici de « statiques », au sens où l'on suppose qu'un décideur choisit de mener une politique telle que décrite dans l'un des scénarios en 2020, puis s'y tient quoiqu'il arrive, et quelques

soient les informations nouvelles qu'il pourrait acquérir.

Le **premier enseignement** de cette évaluation des politiques statiques est que **la politique optimale** parmi les scénarios de prospective (au sens de la minimisation de la somme des coûts des dommages et d'évitement au long de la période considérée) **dépend largement de l'horizon retenu** :

- si l'on retient l'horizon 2060, la politique « pire climatique » ressort comme optimale ;
- si l'on retient l'horizon 2100, la politique « ambition de base (moyen) » ressort comme optimale ;
- si l'on retient l'horizon 2300, la politique de « poussée technologique » ressort comme optimale.

On voit que plus l'horizon considéré est long, et plus la politique optimale (au vu du critère de somme des coûts d'évitement et des dommages) est sévère et comporte un important effort d'évitement pour éviter des dommages importants ultérieurs. Il s'agit probablement d'une conséquence de la concavité de la loi reliant les coûts des dommages à la hausse de température, chaque degré additionnel étant donc plus lourd de conséquences que le précédent. Cette influence de la concavité est corroborée par les récents travaux de Bretschger et al. mentionnée plus loin.

Le **second enseignement** est que **la politique menant à la neutralité carbone ne ressort pas étonnamment pas comme économiquement optimale avec les paramètres retenus dans ce modèle. Une cause possible** semble être **l'importance des coûts d'évitements associés à cette politique**, essentiellement liés aux temps perdus pour augmenter la massification des véhicules et/ou le recours aux transports collectifs, dans une hypothèse où tous les progrès technologiques ne seraient pas au rendez-vous. **L'autre cause possible serait une sous-estimation significative des coûts des dommages.**

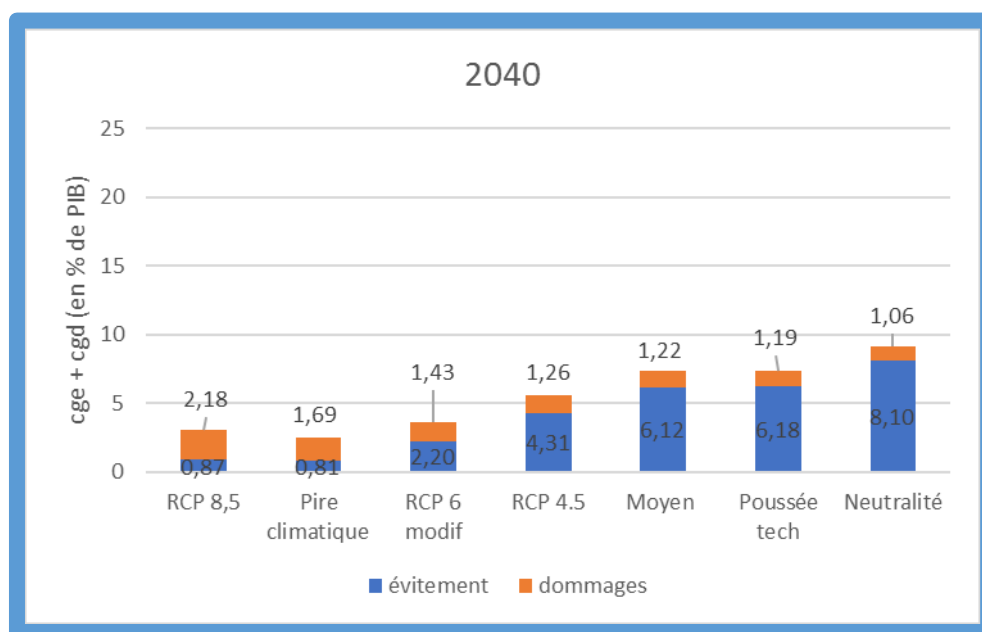
Même si l'évaluation numérique de ces effets par zone de densité est très sommaire, elle semble globalement en première approche cohérente avec les difficultés rencontrées pour massifier les flux de transport sauf dans les zones et axes extrêmement denses comme les radiales franciliennes et faire progresser les parts modales des modes massifiés.

Il est bien sûr possible que dans certains cas la politique statique optimale soit une politique intermédiaire entre « poussée technologique » (qui intègre déjà un peu de télétravail, de renforcement des TC et du vélo) et « neutralité ».

On aurait également pu imaginer une politique de « neutralité » obtenant la réduction des émissions par des mesures de limitation administratives des déplacements, par exemple en allouant des quotas de carbone non échangeables, et en les réservant de manière prioritaire aux déplacements les plus essentiels. Il semble assez difficile d'évaluer les coûts d'une telle politique, mais on peut intuitivement qu'elle serait probablement bien plus coûteuse en termes de coûts d'évitement (notamment du fait des pertes d'opportunité dans les modes de vie et de productivité lié à la moindre division du travail) qu'une politique permettant de se déplacer sans limite *a priori* pourvu que le plafond carbone envisagé dans le scénario soit respecté. À l'inverse, on peut penser à un élargissement des systèmes de quotas échangeables, qui sont en principe globalement moins coûteux pour l'économie même si cet élargissement peut également entraîner des coûts de

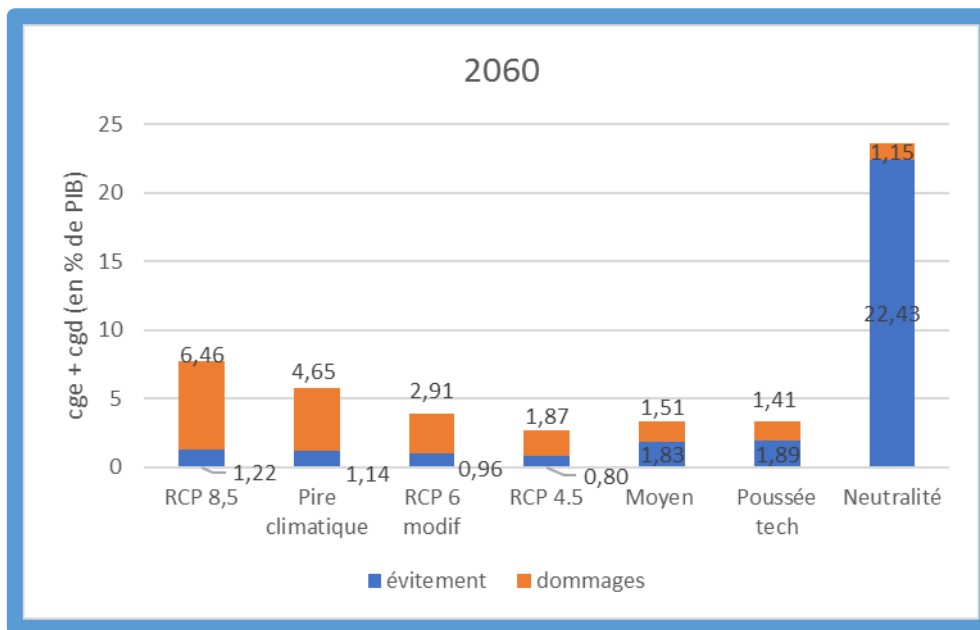
fonctionnement accru du système de gestion des quotas.

Le **troisième enseignement** est que l'on constate que, sauf dans la politique de « pire climatique », **l'essentiel des coûts généralisés sur la période allant jusqu'en 2040 sont constitués par les coûts d'évitement**, avec encore très peu de coûts des dommages au sein du total à ce stade pour cette période des vingt prochaines années. Autrement dit, l'optimisation inter-temporelle semble amener à demander à la génération vivant pendant cette période de faire des efforts d'évitement importants (supporter les surcoûts monétaires et liés aux temps perdus) dans le but d'éviter des dommages trop importants pour la période 2040-2060 et suivantes.



Graphique 5 : Coût évitement et coût des dommages en 2040. Source : Prospective des transports et mobilités CGEDD, France stratégie

Même en 2060, dans les politiques « ambition de base (moyen) » ou « poussée technologique » les coûts d'évitement font encore jeu égal en première approche avec les coûts des dommages, de manière à éviter des dommages encore plus importants ultérieurs. Le graphique montre également l'ampleur du coût d'évitement par recherche de sobriété des déplacements vers 2050-60 si l'on voulait atteindre les objectifs de la politique de neutralité.



Graphique 6 : Coût évitement et coût des dommages en 2060. Source : Prospective des transports et mobilités CGEDD, France stratégie

La politique flexible

À la différence des politiques statiques, on suppose ici que le décideur va définir la politique qui lui semble optimale au vu des informations qu'il est susceptible d'acquérir au cours du temps. En pratique, il observe une information de synthèse à chaque début décennie, et en déduit au moyen d'une table préétablie la politique qui lui paraît optimale au vu de ces informations.

Ainsi, si les informations sont devenues inquiétantes sur le lien entre le coût des dommages et la température, ou entre la température et les émissions cumulées, alors il va mener une politique plus sévère impliquant des efforts plus importants.

Concrètement, ce parcours est défini par un coefficient multiplicatif $K(i,t)$ majorant le coût des dommages à température donnée par rapport à la formule quadratique de Nordhaus indiquée ci-dessus.

Autrement dit :

$$\text{Coûts_dommages}(i,t) = K(i,t) * (a * (DT)^2 + (b * DT))$$

Où DT est la hausse de température, t l'année et i le numéro du tirage au sort effectué.

Ainsi si $K(i,t) = 1$, on retrouve la formule de Nordhaus.

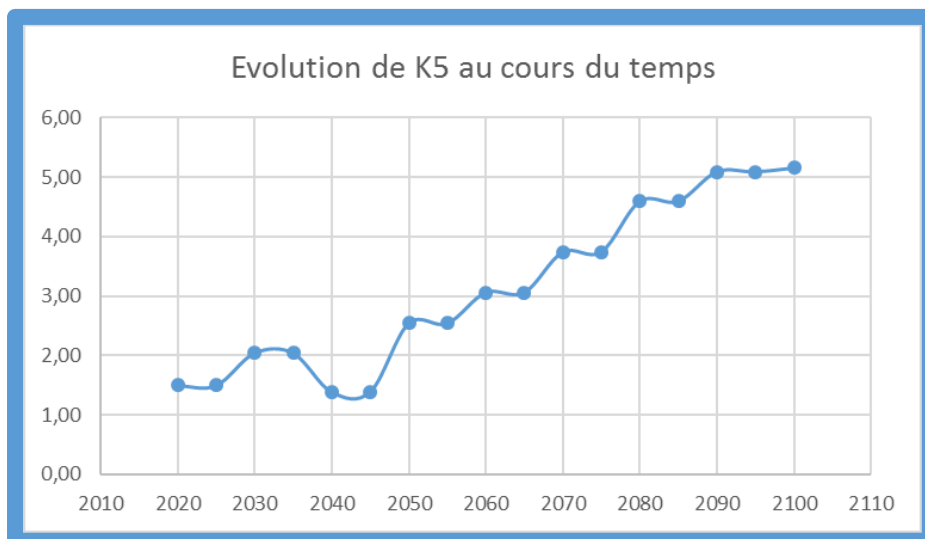
Les lois de tirage au sort sont établies pour correspondre globalement à la loi de répartition des coûts du dérèglement climatique au cours du XXI^{ème} siècle issue du sondage effectué dans Metaculus.

Les coûts d'évitement ne sont pas supposés entachés d'un aléa dans la mesure où leur

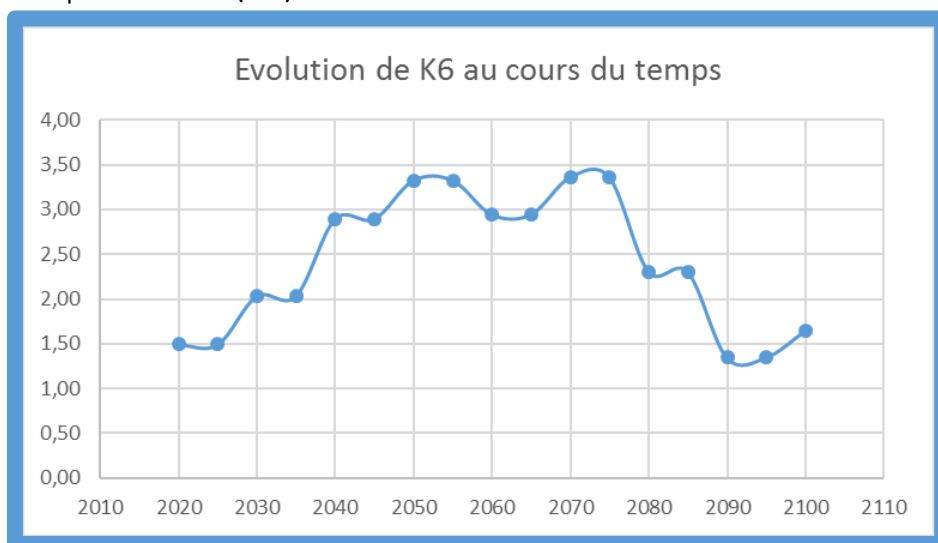
estimation semble plus prudente et relativement moins incertaine.

On peut ainsi avoir des tirages au sort où $K(i,t)$ par exemple (Source : Prospective des transports et mobilités CGEDD, France stratégie) :

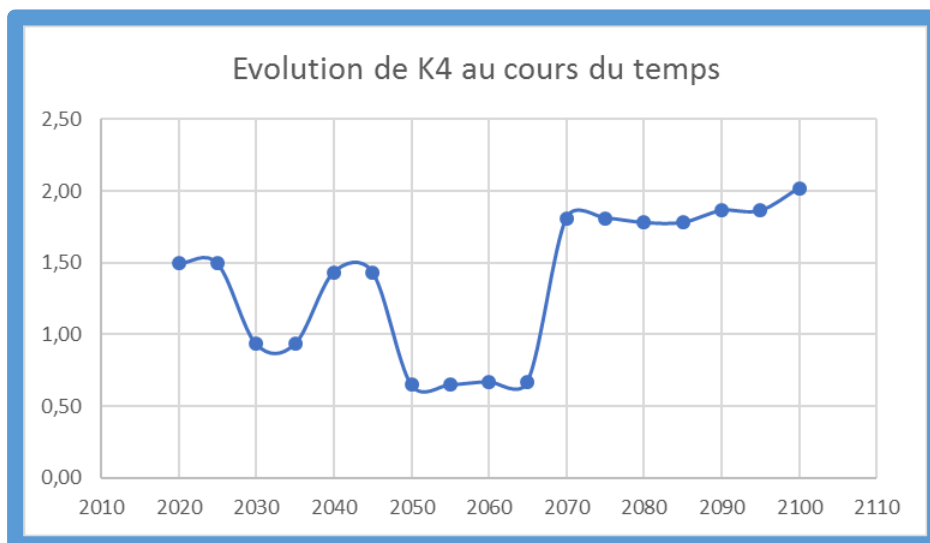
- Croît ($i=5$)



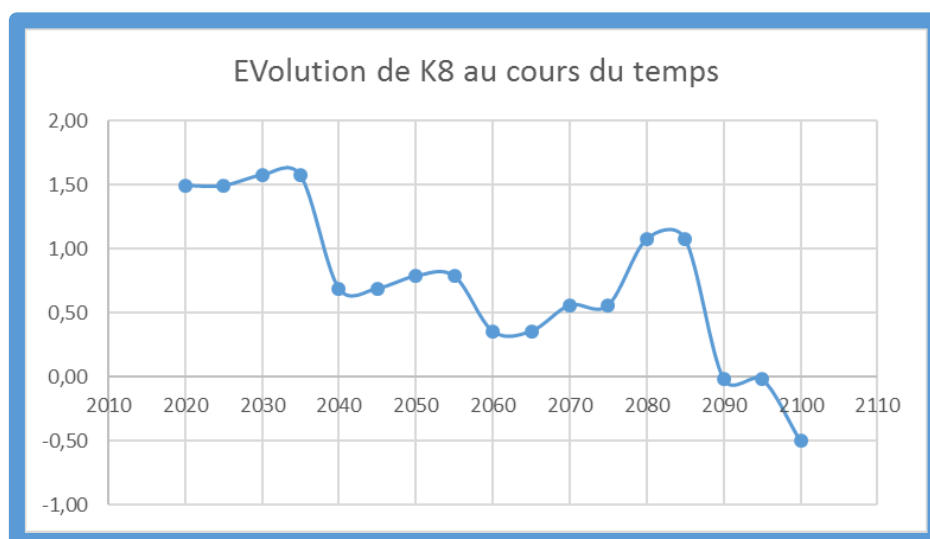
- Croît puis décroît ($i=6$)



- Décroît puis croît (i=4)



- Décroît (i=8)



Dans chaque tirage au sort, en fonction de l'horizon temporel défini, le modèle définit une politique $u(i,t)$ qui semble la plus optimisée compte tenu de la valeur de $K(i,t)$ pour le tirage au sort numéro i et à l'instant t .

Le nouveau coût généralisé total à la date t est :
 coût d'évitement ($u(i,t)$) + $K(i,t) \cdot (a \cdot (DT(u(i,t)))^2 + (b \cdot DT(u(i,t))))$

où $DT(u(i,t))$ est la hausse de température dans le tirage au sort numéro i résultant de la politique $u(i,t)$ pour les années antérieures.

Pour évaluer la politique flexible, on examine avec le même parcours $K(i,t)$ comment elle se situe au vu de l'objectif (somme des coûts des dommages et d'évitement sur la période) par rapport à la politique statique semblant optimale *a priori* dans le même horizon.

De manière empirique, il semble que la politique flexible ressort assez rarement comme meilleure que la politique statique optimisée d'un décideur qui aurait défini une politique statique *a priori* au vu des informations disponibles par la suite, mais qu'elle ne s'en éloigne assez peu en moyenne en pratique.

En revanche, un décideur qui figerait sa politique en 2020 peut, dans certains tirages au sort où $K(i,t)$ évolue significativement, mener une politique bien plus sous-optimale, notamment :

- en menant une politique trop sévère qui ne s'avérerait pas justifiée *in fine* par une évolution *in fine* rassurante des informations, avec sous optimalité du fait de coûts d'évitements élevés non nécessaires ;
- ou en sens contraire en menant une politique trop laxiste qui ne s'avérerait pas justifiée *in fine* par une évolution *in fine* inquiétante des informations, avec sous optimalité du fait de coûts de dommages *in fine* trop élevés.

Discussion

L'approche semble donc amener à privilégier une politique flexible tenant compte des évolutions de l'information disponible.

Les valeurs numériques ayant servi au calage du modèle sont inévitablement très incertaines. Leur estimation repose, notamment pour les scénarios extrêmes, sur des fonctionnements très éloignés de la situation actuelle, à la fois du système climatique (pour les scénarios à forts dommages) ou du système de mobilité (pour les scénarios à fort effort d'évitement).

Le modèle ne prend en compte que des incertitudes sur les dommages, pas sur les coûts d'évitement. Les types d'incertitudes sont potentiellement assez sensiblement différents.

Ainsi les coûts généralisés d'évitement pourraient être réduits si les effets d'apprentissage se révélaient plus importants qu'anticipé, à la fois dans leur composante monétaire (moindres surcoûts des motorisations décarbonées que prévu) ou bien dans leur composante temporelle (par exemple une puissance de charge plus élevée que prévue menant à des temps de recharge notamment interurbains plus rapides que prévus). On connaît également très mal les possibilités d'agir sur le levier du remplissage des véhicules, ce qui amène également à de fortes incertitudes sur les coûts d'évitement notamment dans une politique allant vers la neutralité. Cependant le sujet des coûts d'évitement semble moins marqué par le sujet de l'épaisseur des queues de distribution que celui des coûts des dommages.

Du côté des coûts des dommages, les incertitudes, surtout dans le sens des mauvaises surprises, semblent plus difficiles à borner.

L'estimation des coûts des dommages semble surtout porter sur une partie des dommages marchands, par exemple les pertes de production agricole liées à la température ainsi que les conséquences des dommages liés au relèvement du niveau de la mer. Pour d'autres dommages marchands, l'estimation de leur valeur économique semble plus incertaine. Un des principaux problèmes rencontrés semble l'étalonnage du montant des dommages en

fonction de la température, où par définition des élévations importantes n'ont pas encore été rencontrées. Dans certains cas, une description physique semble envisageable (par exemple les événements météorologiques extrêmes) pouvant se prêter à des tentatives de valorisation³¹. Dans d'autres cas, des facteurs de risque semblent faire consensus (par exemple les risques sur la santé humaine qu'indiquent l'IPBES et le GIEC) mais la fréquence d'occurrence et la gravité ne sont pas encore estimées.

Cet effet est probablement encore plus significatif pour les dommages non marchands pour lesquels les données susceptibles d'être utilisées dans l'évaluation sont encore plus lacunaires³².

La littérature scientifique semble également divisée sur le mode principal des dommages, entre un effet sur la production elle-même ou bien un effet sur le taux de croissance économique, ou un mix des deux. Dans un cas comme dans l'autre, il ne semble pas non plus y avoir de consensus sur la forme de la fonction à retenir, linéaire, quadratique, quartique, ... additif, multiplicatif, Pour de faibles élévations de température, les divergences peuvent être relativement modérées, pour des élévations plus fortes, notamment au-delà de trois degrés³³, il semble que l'incertitude complète règne³⁴.

Vient s'ajouter la question des irréversibilités potentielles dans la relation entre les émissions cumulées et la température liées à des possibilités de boucles de rétroaction positives menant à des irréversibilités.



Illustration 22 : Sécheresse dans le monde - Crédit : Pixabay

31 Voir par exemple "Linking temperature to catastrophe damages from hydrologic and meteorological extremes", Wasko et al, novembre 2021, journal of hydrology

32 « *Quantifying the economics of climate risk change* », Diaz et al, *Nature climate change*, novembre 2017, donne une revue plus complétée des types de dommages et des incertitudes liées à leur valorisation.

33 Voir "As bad as it gets : how climate damage functions affect growth and the social cost of carbon", Bretschger et al, janvier 2018, *Environmental and resources economics*, qui simule une fonction quartique (exposant 4) des dommages en fonction de la température, aboutissant à une valeur du carbone environ 10 fois plus élevée qu'avec une fonction linéaire

34 Voir également « *What is the damages function for global warming, and what difference might it make?* », Weitzmann, 2010, *Climate change economics*

En présence de risque d'irréversibilité, la politique optimale est probablement plus prudente et donc plus sévère que l'*optimum* qu'obtient le modèle. Le problème étant que dans la grande incertitude sur l'existence et l'importance le cas échéant de ces effets, couplée avec celle du degré d'inertie technico-économique, il semble assez difficile de situer s'il faudrait être un peu ou beaucoup plus prudent que la politique que le modèle donne comme optimale.

Le modèle ne permet donc pas de complètement indiquer le degré de sévérité d'une politique optimale, autrement que d'indiquer que si on retient un horizon de très long terme, la politique de « poussée technologique » (décarbonation des motorisations et des empreintes avec des éléments modérés de sobriété) semblerait une base de départ non manifestement déraisonnable pour initialiser une politique flexible ensuite au vu des informations nouvelles s'il n'y avait pas de risque d'irréversibilité.

Si on fait tourner le modèle à l'envers, il semble qu'il faudrait une très nette sous-évaluation des dommages, de l'ordre d'un facteur multiplicatif de 50 fois (à même forme quadratique des dommages en fonction de la température) pour que la politique de neutralité présente les conditions d'optimalité liées à la minimisation de la somme des coûts d'évitement et des dommages à très long terme.

Le problème est de situer l'ampleur de la marge de sécurité dont on dispose. L'évolution de la qualification de l'intensité des dommages dans les différents rapports du GIEC semble inciter à la prudence, dans la mesure où la zone des trois degrés était, il y a peu de temps, considérée comme à risque faible et désormais qualifiée de risque moyen à élever.

Le graphique ci-dessous tiré de « *global non linear effects of temperature on economic production* » (Burke et al, nature letters) illustre l'incertitude radicale sur les coûts des dommages en fonction de la température si l'on prend en compte des effets non linéaires.

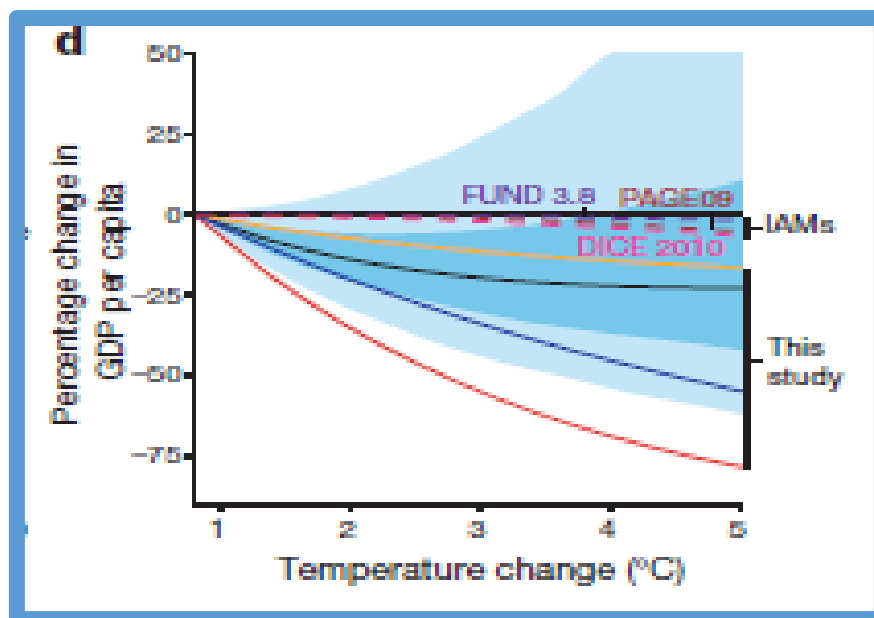


Illustration 23 : Coûts des dommages en fonction de la variation température selon diverses études (source : Burke et al)

Si la proportionnalité des politiques menées aux enjeux semble un bon principe, sa mise en œuvre semble donc délicate. C'est probablement la raison pour laquelle l'évaluation de l'opportunité de mesures de politiques publiques de sobriété des déplacements, allant au-delà du champ mieux balisé de celles sur les motorisations, est également difficile du fait l'incertitude assez radicale sur les coûts des dommages qui pourraient résulter de leur non mise en œuvre.

Cette incertitude devrait conduire :

- d'une part à réactualiser périodiquement (une périodicité de l'ordre de cinq ans semblerait un bon compromis) les scénarios étudiés pour y intégrer les connaissances acquises depuis l'exercice précédent afin de lever au moins en partie certaines incertitudes ;
- et, d'autre part, étudier de façon concrète les conditions de mise en œuvre des décisions suspendues au titre de l'absence de proportionnalité à un instant donné de sorte que si un diagnostic de proportionnalité peut être posé lors de l'exercice suivant, les délais de mise en œuvre effective soient réduits, en particulier parce que les études de calage de l'ampleur et des conditions pratiques de mise en œuvre d'une décision conditionnelle ont été réalisées en temps masqué.

Comment estimer les coûts des politiques de motorisation et de sobriété

(Cas des mobilités voyageurs terrestres)

Les coûts socio-économiques de diverses politiques publiques

Trois politiques publiques sont décrites en matière de mobilité, qui sont croisées avec trois ambiances de technologies de motorisations :

- politique « laxiste/individualiste » avec pas ou très peu de régulation publique ;
- politique « de sobriété moyenne », avec de la régulation publique jusqu'à un niveau jugé comme encore relativement acceptable ;
- politique « de sobriété renforcée », avec la régulation publique nécessaire pour atteindre vers 2060 la neutralité dans l'ambiance de technologie de motorisation la plus favorable.

Ainsi que des ambiances de motorisation plus ou moins ambitieuses :

- Haute
- Moyenne
- Basse

Sur la base des scénarios définis, l'idée est d'estimer un ordre de grandeur des coûts socio-économiques associés par année ou période. Ces coûts peuvent être de nature :

- Monétaires
- Temps perdu
- Autres

Au moyen d'une valeur du temps, on peut se ramener à des pertes de % de PIB sur la période, puis en moyenne non pondérée sur le XXIème siècle de manière à comparer les ordres de grandeur des coûts socio-économiques de ces politiques de mobilités et de motorisations aux coûts des dommages.

On se limitera dans un premier temps aux seules mobilités des voyageurs (en utilisant une clé 2/3 voyageurs 1/3 marchandises au sein des émissions de CO₂eq), et en au sein de ceux-ci les seuls voyageurs terrestres (donc hors aérien). On examinera à cet effet les mesures principales figurant dans les différents scénarios afin de dégager de premiers ordres de grandeur.

Annexe 6 : Glossaire des sigles et acronymes

Acronyme	Signification
ACV	Analyse en cycle de vie
ADAS	<i>Advance driver assistance system</i>
AO	<i>Autorité organisatrice</i>
AOM	<i>Autorité organisatrice de la mobilité</i>
BECCS	<i>Bioénergie avec captage et stockage du carbone</i>
CGEDD	<i>Conseil général de l'environnement et du développement durable</i>
CCS	<i>Combined charging system</i>
CDR	<i>Carbon doxyde removal</i>
CO ₂	<i>Di oxyde de carbone</i>
CO ₂ e ou CO ₂ eq	<i>Equivalent CO₂</i>
CSC	<i>Coût social du carbone</i>
DACCS	<i>Direct air carbon capture and storage</i>
EDP	<i>Engins de déplacement personnel</i>
FIT	<i>Forum international des transports</i>
GES	<i>Gaz à effet de serre</i>
GIEC	<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i>
H ₂	<i>Hydrogène</i>
HCC	<i>Haut conseil pour le climat</i>
IAM	<i>Integrated Assessment Models</i>
IPBES	<i>Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services</i>
LGV SEA	<i>Ligne à grande vitesse sud Europe atlantique</i>
LGV BPL	<i>Ligne à grande vitesse Bretagne Pays de la Loire</i>
NO _x	<i>Oxydes d'azote</i>
OACI	<i>Organisation internationale de l'aviation civile</i>
OMI	<i>Organisation internationale maritime</i>
ONG	<i>Organisation non gouvernementale</i>

Acronyme	Signification
ONU	<i>Organisation des nations unies</i>
PIB	<i>Produit intérieur brut</i>
R&D	<i>Recherche et développement</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
SLFC	<i>Short Lived Climate Forcers</i>
SNBC	<i>Stratégie nationale bas carbone</i>
SRM	<i>Solar Radiation Management</i>
TC	<i>Transports en commun</i>
TCU	<i>Transmission control unit</i>
TICPE	<i>Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques</i>
USD	<i>Dollar des États-Unis</i>
VAC	<i>Valeur de l'action carbone</i>
VAE	<i>Vélo à assistance électrique</i>
VL	<i>Véhicules légers</i>
VP	<i>Voiture particulière</i>
ZEC	<i>Zone d'exploitation contrôlée</i>
ZEN	<i>Zéro émissions nettes</i>
ZFE-m	<i>Zone à faibles émissions motorisation</i>

[Site internet du CGEDD : « Les derniers rapports »](#)
[Site internet de France Stratégie : « Publications »](#)