

# Rapport de stage individuel

4<sup>ème</sup> année

Aide à la décision publique sur la qualité des mobilités  
compte tenu des incertitudes environnementales



Conseil général de l'environnement et du  
développement durable

Tour séquoia, Place Carpeaux 92055 Nanterre

Tuteur entreprise : Alain Sauvant, directeur de  
l'Agence de la Qualité de services dans les  
transports.

Tuteur académique : Kamal Serrhini,  
maître de conférences à l'université de  
Tours.

Chloé Vallon

IUT

2020-2021

## Table des matières

I.	Introduction.....	1
II.	Présentation de la structure d'accueil .....	1
1.	Un stage au sein du ministère de la transition écologique.....	1
2.	... dont l'Agence de la Qualité de Service dans les Transports est une entité .....	2
III.	Présentation de la démarche .....	2
1.	Contexte de la démarche .....	3
A)	Le contexte de l'urgence climatique .....	3
B)	Présentation d'un document précurseur .....	3
2.	L'organisation de la démarche .....	4
3.	Les objectifs de la démarche .....	4
A)	Deux horizons temporels : 2040 et 2060 .....	5
B)	Les scénarios envisagés.....	5
IV.	Présentation de la mission .....	6
1.	Le modèle des émissions de voyageurs terrestres en France.....	7
A)	Variables exogènes.....	7
B)	Calcul des variables intermédiaires de sobriété.....	8
C)	Calcul des variables de motorisation.....	11
D)	Output en fonction de la tendance selon le PIB.....	11
E)	Principaux résultats et regard critique .....	12
2.	Etude du marché prévisionnel Metaculus.....	14
A)	Description de la méthode .....	14
B)	Principaux résultats .....	16
3.	La recherche d'un optimum entre les coûts des dommages et les coûts d'évitement .....	16
A)	Distribution des dommages en pourcentage de perte de PIB .....	16
B)	Liens entre émissions de gaz à effet de serre et décision publique.....	18
C)	Des valeurs pour les scénarios « repères » issues du modèle précédent.....	19
D)	... et pour les scénarios RCP du GIEC.....	19
E)	Des émissions aux dommages en passant par le réchauffement .....	22
F)	Introduction d'un facteur d'incertitudes.....	24
V.	Conclusion et retour réflexif sur le stage .....	28
1.	Organisation du stage .....	28
2.	Les difficultés rencontrées .....	29
3.	Vers un univers professionnel .....	29
VI.	Bibliographie.....	30
	Annexes .....	31

## Table des tableaux

Tableau 1/ Variables exogènes sur la sobriété pour le modèle voyageurs terrestres.....	7
Tableau 2/Variables exogènes sur la motorisation pour le modèle voyageurs terrestres. ....	7
Tableau 3/Variables exogènes pour réaliser les chroniques dépendantes du PIB. ....	7
Tableau 4/Exemple de dix lignes issues de la première étape de calcul. ....	17
Tableau 5/Exemple de dix lignes après la seconde étape de calcul.....	17
Tableau 6/Exemple d'un run avec une chronique de K .....	25

## Table des figures

Figure 1/Schéma des six scénarios envisagés. Source: documents internes.....	6
Figure 2/Niveau de la taxe carbone des véhicules particuliers au cours du temps (auteure : C. VALLON) .....	10
Figure 3/Effet de la taxe carbone des véhicules particuliers au cours du temps (auteure : C. VALLON). ....	10
Figure 4/Chronique des émissions du transport terrestre de voyageurs selon les scénarios (auteure : C. VALLON). ....	12
Figure 5/Chronique des émissions du transport aérien de voyageurs selon les scénarios (auteure : C. VALLON). ....	12
Figure 6/Chronique des émissions du transport terrestre de marchandises selon les scénarios (auteure : C. VALLON).....	13
Figure 7/Parts relatives de la sobriété et de la motorisation dans la réduction des émissions (auteure : C. VALLON). ....	13
Figure 8/Part des différentes variables de sobriété dans la réduction des émissions (auteure : C. VALLON). ....	14
Figure 9/Courbe de répartition des réponses à la question des dommages en perte de PIB sur le siècle. Source: Metaculus.....	15
Figure 10/Comparaison entre la loi log normale et la répartition des réponses (auteure : C. VALLON). ....	16
Figure 11/Réchauffement et émissions cumulées en fonction du temps. Source : GIEC AR5.....	20
Figure 12/Emissions nettes annuelles dûes aux voyageurs terrestres selon les scénarios (auteure C. VALLON). ....	21
Figure 13/Réchauffement en fonction des émissions (auteure C. VALLON) .....	22
Figure 14/Réchauffement selon les scénarios (auteure : C. VALLON) .....	22
Figure 15/Fonction quadratique des dommages en fonction du réchauffement (auteure : C. VALLON, d'après Nordhaus) .....	23
Figure 16/Dommages en perte de PIB selon les scénarios (auteure : C. VALLON) .....	23
Figure 17/Evolution de K1 au cours du temps pour un run (auteure : C. VALLON). ....	26
Figure 18/Coût des dommages selon les scénarios pour un run (auteure : C. VALLON). ....	26
Figure 19/ Coût d'évitement selon les scénarios pour un run (auteure : C. VALLON). ....	27
Figure 20/Somme des dommages et évitement pour un run (auteure : C. VALLON).....	27
Figure 21/ Calendrier de déroulement du stage (auteure : C. VALLON).....	28

## Table des annexes

Annexe 1- Arborescence des variables du modèle voyageurs terrestres. ....	31
Annexe 2 – Comparaison entre la loi normale et la distribution des réponses. ....	32
Annexe 3- Comparaison entre la loi de Laplace et la distribution des réponses. ....	32
Annexe 4 – Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne 2020-2060 ; K=1. ....	33
Annexe 5- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur le siècle ; K=1. ....	33
Annexe 6- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur trois siècles ; K=1. ....	34
Annexe 7- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne 2020-2060 ; K=4. ....	34
Annexe 8- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur le siècle ; K=4. ....	35
Annexe 9- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur trois siècles ; K=4. ....	35

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, je remercie mon maître de stage, M. Alain Sauvart, directeur de l'Agence pour la Qualité de Service dans les Transports pour son accueil, le temps qu'il m'a accordé et le partage de ses connaissances. Il a fait preuve d'une grande bienveillance qui m'a mis en confiance pour accomplir au mieux mes missions. Son aide a été indispensable à l'accomplissement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier mon tuteur pédagogique, M. Kamal Serrhini de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours pour son accompagnement et son écoute. Ses conseils et avis sincères m'ont guidé au cours de ce stage.

## I. Introduction

Ce stage a été réalisé en tant que projet de fin de quatrième année dans le cadre de ma formation à Polytech Tours. Afin de compléter les enseignements suivis en Génie de l'Aménagement et de l'Environnement, j'ai décidé de profiter de cette expérience professionnelle qui est une opportunité d'approfondir mes connaissances dans ce domaine.

J'ai choisi d'effectuer ce stage au sein du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable et plus particulièrement auprès d'Alain Sauvart, directeur de l'Agence de la Qualité de Service dans les Transports pour conforter l'idée de mon projet professionnel. En effet, je souhaite spécialiser mon profil d'ingénieur en aménagement et environnement aux transports. Il m'a donc paru important d'avoir une expérience plus poussée dans ce domaine, d'autant plus qu'elle me permettait aussi d'étudier l'impact environnemental du transport.

La mission a consisté à développer un faisceau de scénarios de politiques de sobriété et de motorisation pour observer dans quelle mesure ces politiques permettent une réduction des émissions. Une approche a été menée pour déterminer les coûts induits par la mise en œuvre de ces politiques mais aussi le coût des dommages occasionnés si des solutions trop laxistes étaient envisagées face à l'enjeu du dérèglement climatique.

Durant ce stage j'ai donc pu découvrir plus précisément le métier d'ingénieur, son intérêt et les difficultés qui se posent. Cela s'est révélé formateur pour moi puisqu'il m'a permis de mettre en pratique les connaissances issues de ma formation à Polytech Tours.

## II. Présentation de la structure d'accueil

### 1. Un stage au sein du ministère de la transition écologique...

J'ai effectué mes 18 semaines de stage au sein du ministère de la transition écologique et plus précisément du conseil général de l'Environnement et du Développement durable (CGEDD). Son but est de conseiller le Gouvernement dans divers domaines comme l'environnement, les transports, les travaux publics, l'aménagement durable des territoires, le logement, l'urbanisme, ou encore la politique de la ville face au changement climatique.

Ses missions, ordonnées par le Gouvernement sont donc variées : de l'expertise à l'audit en passant par les études et évaluations. Certaines missions peuvent être menées en coopération internationale. Le CGEDD a aussi une mission d'inspection générale sur la qualité et l'efficacité de l'action des services de l'État placés sous l'autorité du ministre de la Transition écologique et solidaire et des établissements publics dont ces services sont responsables. Mon stage étant un stage de décision publique sur la qualité des mobilités compte tenu des incertitudes environnementales, j'ai été plus particulièrement concernée par le volet environnement du CGEDD. En effet, le conseil est aussi une autorité environnementale, qui émet des avis et prend des décisions sur le respect de la qualité environnementale des projets qui sont soumis à son contrôle.

Concrètement, il s'agit de produire des rapports d'étude, d'avis ou d'inspection dans les domaines qui suivent : Habitat, cohésion sociale et développement territorial ; Mobilités et transports ; Milieux, ressources et risques ; Transition énergétique, construction et innovations ; Audits, inspections et vie des services ; Ressources humaines et moyens.

Le Conseil général de l'environnement et du développement durable est donc divisé en six sections, qui sont chacune spécialisée dans l'un des thèmes cités au-dessus.

Ayant un intérêt particulier pour le domaine des transports, mon stage s'articulait autour de l'environnement certes, mais plus précisément des impacts du transport sur l'environnement. C'est donc la section mobilités et transports, présidée par Pierre-Alain Roche qui va davantage nous intéresser. Cette section s'intéresse aux réseaux et aux infrastructures de transport, mais aussi aux services de transports et de mobilité. Elle évalue les grands projets de transport, tant sur leur financement et la fiscalité, que sur leur construction, leur entretien, leur usage ou encore la sécurité et la sûreté. Au-delà des infrastructures, la section participe à l'organisation française et européenne des marchés de transport et régule l'offre et la demande dans ces services, tant pour les voyageurs que pour les marchandises. Elle gère aussi des réseaux, d'eau d'énergie ou encore d'information.

Enfin son rôle, s'illustrant le plus fortement au cours de mon stage, est celui qui consiste à veiller à la contribution des transports dans les autres politiques, pour assurer la transition énergétique d'un secteur aussi socialement sensible que celui des transports, comme l'a bien montré la crise des gilets jaunes en 2019.

## 2. ... dont l'Agence de la Qualité de Service dans les Transports est une entité

Mon stage, supervisé par Alain Sauvant a plus particulièrement pris place au sein de l'Autorité de la qualité de service dans les transports (AQST).

L'AQST est une entité autonome du ministère chargé des transports, elle est placée, en raison de sa vocation intermodale, au sein du conseil général de l'Environnement et du Développement durable (CGEDD) du ministère de la Transition écologique. Son but est de rechercher les voies pour l'amélioration de la qualité de service dans les transports. Elle participe aussi aux travaux de la réunion de dialogue national sur la qualité de service dans les transports (RDNQST), qui regroupe des associations de voyageurs et de consommateurs, des opérateurs, les pouvoirs publics ...

L'AQST vise à améliorer la qualité de service dans les transports de voyageurs, tant en situation ordinaire que perturbée. Cela concerne à la fois les transports de voyageurs terrestres (ferroviaires et routiers, urbains et interurbains), mais aussi maritimes et aériens. La régularité, la ponctualité et la qualité de l'information diffusée aux voyageurs sont les trois aspects principalement étudiés.

Mais, la qualité de service dans les transports se définit plus directement comme l'aptitude du système de transports à répondre aux besoins de ses utilisateurs. Elle comprend 8 principales composantes identifiées par l'AFNOR dans la norme NF EN 13816 : offre de service, accessibilité, information, durée, attention portée au client, confort, sécurité, impact environnemental.

Actuellement et dans le cadre de l'aspect environnemental de la qualité de services, l'AQST vise à mieux comprendre la manière d'optimiser la décision publique sur le long terme (2040 et 2060) en matière de qualité environnementale de la mobilité des voyageurs, en présence d'incertitudes notamment environnementales. C'est dans cet objectif et sur cette mission que j'ai travaillé durant 18 semaines avec Alain Sauvant.

## III. Présentation de la démarche

Le but est de trouver les décisions publiques optimales pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2060 dans le secteur des transports, en prenant en compte l'acceptabilité par la société et les incertitudes concernant l'évolution du climat.

Il s'agit de définir plusieurs scénarios de prospective possibles pour les mobilités des voyageurs et des marchandises, et d'étudier leurs conséquences en matière d'activité et d'environnement. La démarche associe le CGEDD et France stratégie. Elle comprend aussi la participation de l'AQST et réunit des agents et des chercheurs publics. Pour aller au-delà d'un travail qui ne serait basé que sur des scénarios statiques, la démarche comporte une réflexion sur la prise en compte des nombreuses incertitudes technologiques et sociétales intrinsèques à ce domaine.

## 1. Contexte de la démarche

### A) Le contexte de l'urgence climatique

Cinq ans après les accords de Paris, le 12 décembre 2020, l'ONU a convoqué un sommet pour la planète. Il a notamment été l'occasion d'appeler les gouvernements à déclarer l'état d'urgence climatique dans leurs pays respectifs et à conserver cet état jusqu'à ce que la neutralité carbone soit atteinte. L'Union européenne avait déjà pris en décembre 2019 l'engagement du pacte vert, qui devait aboutir à la neutralité carbone à l'horizon 2050. La France s'est aussi engagée sur cet objectif à travers la loi énergie-climat depuis le 08 novembre 2019. Notre pays doit donc basculer rapidement la provenance de son mix énergétique pour décarboner les transports et la production d'électricité. Dans le même temps cette loi engage une réduction de la part du nucléaire dans le mix énergétique, qui implique donc des investissements massifs pour développer les énergies vertes (éoliens, hydraulique, solaire, ...).

Il faut néanmoins veiller au respect de l'égalité, de la justice sociale, y compris dans l'aérien et le maritime, ainsi qu'à la faisabilité économique des mesures envisagées, dans un contexte financier déjà fragilisé.

Le rapport de l'ONU suite au sommet de décembre 2020 indique que le transport est responsable de près du quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre. De plus, d'ici 2050, on devrait assister à une multiplication par deux de ces émissions. Cette part est encore plus importante en France, où le secteur des transports représente environ 40% des émissions de gaz à effet de serre, notamment en raison d'une production d'électricité nucléaire et donc fortement décarbonée. Cependant, il reste possible d'endiguer ce phénomène en prenant rapidement des mesures concrètes, comme l'adoption de motorisation électrique, ou en tout cas décarbonée, à la fois pour les particuliers et les transports publics et privés, de voyageurs comme de marchandises. Un effort est aussi à fournir sur le développement des infrastructures pour favoriser des modes de déplacements non polluants (à pied ou en vélo) ou encore pour favoriser l'augmentation de l'import moyen, avec des voies réservées aux covoiturages.

L'encouragement aux mobilités actives aura aussi des bénéfices en matière de santé publique, alors même que le Conseil d'Etat vient, en août 2021, de condamner l'Etat à 10 millions d'euros d'amende en raison de l'insuffisance des mesures prises pour préserver la qualité de l'air. En l'absence de réduction des émissions des véhicules, la mortalité résultant de l'exposition aux gaz d'échappement dans les zones urbaines devrait augmenter de plus de 50 % d'ici 2030.

### B) Présentation d'un document précurseur

L'Union européenne a présenté fin 2020 une stratégie de mobilité durable pour réduire les émissions de carbone du secteur des transports de 90% avant 2050. Cette stratégie introduit notamment l'idée de déplacements multi modaux, tant pour les voyageurs que pour les marchandises.

Un document précurseur à celui qui va être construit au cours de cette mission a été établi en 2005. En effet, le Conseil général des ponts et chaussées avait alors publié une démarche de prospective des

transports à horizon 2050. Elle avait permis de dessiner des scénarios possibles des transports et de la mobilité ainsi que mis en lumière quelques pistes pour l'action publique. Elle avait identifié quatre scénarios, certains aspects ressortent dans chacun d'eux :

- L'effort de transfert modal vers les transports en commun et le ferroviaire n'a qu'un faible impact.
- L'importance du TGV et de l'avion est croissante dans un monde où les déplacements longue distance sont de plus en plus fréquents, tandis que les trajets courts ne sont pas plus nombreux.
- La substitution au pétrole, permettant la réduction des émissions est variable selon les scénarios, mais elle dépend essentiellement de :
  - la politique du véhicule : la manière d'utiliser le véhicule, pour les trajets longs comme courts, le moteur essentiellement à partir d'énergies fossiles malgré l'apparition de l'hybride rechargeable.
  - la politique des carburants : il faut utiliser au maximum la motorisation électrique pour les trajets courts, et en général favoriser les biocarburants, à condition d'en fabriquer proprement et en quantité. Un effort peut être fait sur les rendements des moteurs.
- Le transport routier de marchandises resterait le plus courant en étant toujours fortement carboné ; la taille des PL pourrait augmenter pour permettre dans le même temps une diminution des prix et une diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Le but, grâce à ces mesures était de permettre la division par trois dans le secteur du transport terrestre. Depuis la publication de ce document en 2005, les progrès technologiques et méthodologiques se sont poursuivis, et il devient pertinent de mener à bien une nouvelle étude. Le Conseil général de l'environnement et du développement durable s'est associé à France stratégie pour avancer dans cette nouvelle démarche.

## 2. L'organisation de la démarche

- Les acteurs de la démarche sont divisés en cinq groupes de travail thématiques :
- Le groupe motorisation a effectué un inventaire précis des technologies disponibles et a calculé pour chacun des modes de transport les réductions envisageables des émissions de gaz à effet de serre.
- Le groupe voyageurs a étudié et quantifié les différents scénarios retenus pour le transport de voyageurs.
- Le groupe marchandises observe et envisage un faisceau d'évolutions possibles des trafics routiers, portuaires, maritimes, ferroviaires, fluviaux et de la logistique urbaine.
- Le groupe aménagement a cherché dans quelle mesure une politique d'aménagement peut contribuer, en réduisant les besoins en mobilité, à la baisse des émissions de CO2 dues aux transports
- Le groupe risques et incertitudes permet de dépasser la démarche statique et de préciser des points des modèles qui présentent beaucoup d'aléa.

Au-delà des groupes de travail, de nombreux acteurs privés (entreprises de l'industrie et des transports), publics (administration) ou semi-publics (association) ont permis de recueillir les données utiles à la prospective.

## 3. Les objectifs de la démarche

Il s'agit d'établir une prospective des mobilités et de leurs conséquences à l'horizon 2060. Les deux commanditaires de ce travail initié en 2019, sont le CGEDD et France Stratégie, ils participent aussi activement à son élaboration. La mobilité peut être définie comme un déplacement de biens ou de personnes sur une certaine distance, d'une origine à une destination, grâce à l'utilisation d'un ou



plusieurs modes et de diverses motorisations. Il est à rappeler que le secteur des transports représente 40 % des émissions de gaz à effet de serre française, ce qui en fait le secteur le plus émissif.

L'objectif majeur de la prospective des mobilités 2040-2060 est de prévoir et d'analyser mathématiquement dans quelles conditions la France pourrait atteindre la neutralité carbone à cet horizon dans le secteur des transports. Cela implique donc de s'intéresser à tous les comportements générateurs d'émissions, dont évidemment les véhicules, leur usage et leur motorisation. Il faut tenir compte de bien d'autres variables qui peuvent influencer sur la mobilité comme la consommation (par la croissance du PIB) ou encore les conséquences de l'urbanisation. En effet, l'organisation spatiale d'un territoire est déterminante dans le comportement de mobilité de ses habitants.

#### A) Deux horizons temporels : 2040 et 2060

2040 marque un horizon à 20 ans, pour lequel on prévoit essentiellement le développement d'évolutions technologiques et de comportements déjà connus ou envisagés aujourd'hui ; des réseaux d'infrastructures et des types de motorisation existants ou décidés (biocarburant, véhicule électrique).

2060 marque un horizon à plus long terme, il y a clairement une ambition de prospective plus profonde, comme dans le rapport de 2005, qui se projetait en 2050. Le champ des possibles est plus large et les incertitudes sont plus grandes. Cependant les événements qui arriveront sont toujours des conséquences liées aux décisions prises en ce moment (infrastructures de transport, organisation des territoires, recherche et technologies...). Le secteur des transports bénéficie d'une inertie assez importante qui permet ce type de projection à 40 ans avec quelques incertitudes, au-delà de 40 ans, les prévisions sont plus délicates.

Les résultats de la démarche forment un faisceau de trajectoires futures de la mobilité, elles prennent en compte les diverses situations qui peuvent survenir. Elles éclairent aussi les risques de prise de décisions inadaptées, ou trop anticipées dans les politiques publiques. Les résultats visent surtout à aider à discerner des leviers d'actions et des paramètres essentiels à la satisfaction d'objectifs individuels et collectifs (niveau de vie, qualité de vie, efficacité économique et sociale, préservation de l'environnement).

#### B) Les scénarios envisagés

Les différents rapports thématiques décrivent des scénarios autour de deux axes :

Il y a trois ambiances technologiques possibles :

- L'ambiance technologique « haute » prévoit le développement de technologies de motorisation décarbonées (biocarburant, électrique, bas carbone) et la diffusion rapide de ces progrès technologiques.
- L'ambiance technologique « moyenne » est celle dans laquelle les accords de Paris sont mis en œuvre, avec un progrès technologique modéré qui se diffuse plus lentement que dans la première ambiance.
- L'ambiance technologique « basse » est caractérisée par une très faible utilisation des motorisations décarbonées (incorporation d'un peu de biocarburant et 30% de véhicules électriques).

Et trois orientations de politique de mobilité :

- La sobriété forte décrit une politique qui limite fortement les déplacements grâce à différentes taxes et à une forte substitution du numérique. L'aménagement urbain et du territoire minimise aussi les émissions de gaz à effet de serre.

- La sobriété moyenne est caractérisée par une politique qui prolonge la tendance actuelle avec le développement des transports en commun et des véhicules propres et dans laquelle l'étalement urbain est freiné mais continue de progresser.
- La sobriété faible, est marquée par l'utilisation de la voiture individuelle et des comportements individualistes, notamment un mauvais usage de la voiture autonome qui entrainera des kilomètres roulés sans voyageur à bord. L'étalement urbain n'est pas limité.

Ces trois politiques de motorisation et ces trois politiques de sobriété nous amènent à considérer les six scénarios présentés sur le schéma ci-dessous :

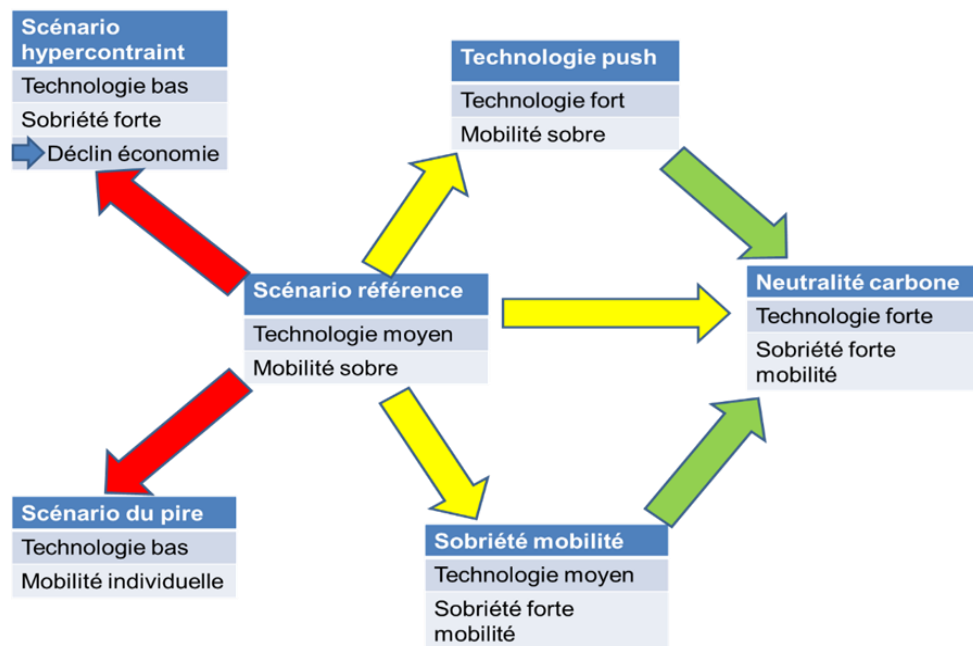


Figure 1/Schéma des six scénarios envisagés. Source: documents internes.

Finalement, cette démarche aura réussi si elle peut faire émerger quelques conséquences des choix possibles de politique publique aux différents niveaux, ainsi que des possibilités d'application à des échelles locales. Elle permet aussi de donner une idée des conséquences néfastes et des risques si les politiques sont trop laxistes, à moyen comme à long terme. On peut néanmoins lui reprocher le manque de prise en compte du caractère irréversible du réchauffement climatique.

#### IV. Présentation de la mission

La mission consiste donc à étudier les impacts des scénarios proposés sur les émissions, puis à calculer leur coût d'évitement et à le comparer au coût des dommages engendrés par les bouleversements climatiques. L'ajout du calcul d'incertitudes permet de renforcer la crédibilité du système et de donner une idée plus précise du regard qu'il faut porter sur les résultats finaux. Un travail rigoureux pour déterminer la valeur des incertitudes sur des facteurs clés bien choisis peut permettre d'affiner ce résultat final. Mais un calcul d'incertitudes doit d'abord se baser sur un modèle statique stable et solide.

## 1. Le modèle des émissions de voyageurs terrestres en France

### A) Variables exogènes

J'ai donc naturellement commencé par un travail sur les modèles statiques d'abord concernant les voyageurs terrestres, puis les voyageurs aériens et enfin les marchandises. La méthode étant identique dans les trois cas, je ne vais présenter en détail que le modèle statique de prospective des émissions de gaz à effet de serre pour les voyageurs terrestres. Le choix est arbitraire, la différence entre ces trois modèles statiques porte sur les variables exogènes et intermédiaires qui sont donc adaptées pour chacun d'eux.

Politique de sobriété	
Variable intermédiaire	Données en input
Individualisme	Emport des véhicules
VP partagé FIT	Pourcentage d'augmentation de l'emport possible en agglomération Pourcentage de la pop qui vit dans un département avec plus de 200 hab/km2
Modes doux	Part des déplacements utilisant les modes doux
Télétravail	Part d'actifs qui télétravaillent Temps télétravaillé par semaine Effet rebond
Effet de la taxe carbone	Elasticité prix Prix du litre d'essence en euros Quantité de CO2 dans un litre en kg Niveau taxe carbone VP Facteur de réduction VE → <a href="#">Motorisation</a>
Carte carbone terre	Emissions de cette population avant la carte Emissions de cette population après la carte
Aménagement	Effet de l'aménagement

Tableau 1/ Variables exogènes sur la sobriété pour le modèle voyageurs terrestres.

Ambiance de motorisation	
Coef multiplicatif ambiance de motorisation	Pourcentage de vente de véhicules à motorisation décarbonée neufs Pourcentage de véhicules à motorisation décarbonée en circulation Facteur de réduction des émissions liées à la décarbonation

Tableau 2/ Variables exogènes sur la motorisation pour le modèle voyageurs terrestres.

Tableau 3/ Variables exogènes pour réaliser les chroniques dépendantes du PIB.

Tendance GES selon le PIB
Valeur du PIB par tête en France
Population française en millions
Elasticité des voy-km au PIB/tête vie quotidienne
Elasticité des voy-km au PIB/tête interurbain
Emissions de départ en MtCO2 eq vie quotidienne
Emissions de départ en MtCO2 eq interurbain
G veh-km route de départ vie quotidienne
G veh-km route de départ vie interurbain
G voy-km de départ vie quotidienne
G voy-km de départ vie interurbain

Le schéma logique présenté en annexe 1 permet de mieux rendre compte de la structure de ce modèle. On y voit les variables exogènes, c'est-à-dire les données entrées en input en bleu foncé aux extrémités de la page. En avançant vers le centre, on trouve les variables intermédiaires en orange clair, qui permettent elles-mêmes de calculer les coefficients multiplicatifs de sobriété et de motorisation (orange foncé). La valeur d'émissions en MtCO<sub>2</sub>eq prévue par le scénario tendanciel PIB multiplié par les deux coefficients multiplicatifs (sobriété et motorisation) donne le résultat final.

La définition de chaque variable ainsi que les calculs correspondant à chaque branche vont être présentés dans la suite de ce rapport. Les sources depuis lesquelles les valeurs des coefficients ont été tirées seront aussi mentionnées.

## B) Calcul des variables intermédiaires de sobriété

### i. Individualisme

La variable individualisme est un reflet de l'emport moyen des véhicules. D'après une enquête (ADEME, 2016), un véhicule particulier transporte actuellement 1.4 passager en moyenne contre 0.7 pour les VTC. L'emport des véhicules est constant dans les politiques de sobriété moyenne et forte. En sobriété faible, ou politique individualiste, cet emport décroît jusqu'à 0.7 passager par véhicule à cause d'un mauvais usage de la voiture autonome.

Calcul : [Emport moyen par véhicule à l'instant t] / [Emport moyen en 2017].

### ii. VP partagé FIT

Le FIT prévoit une baisse de 33% des émissions de CO<sub>2</sub> dans les agglomérations de plus de 1 million d'habitants grâce à l'augmentation de l'emport (FIT, 2018). Des résultats encourageants ont été démontré pour le grand Dublin. En se calant sur cet exemple, on applique l'augmentation de l'emport à tous les départements avec une densité supérieure à 200hab/km<sup>2</sup>. Cela représente 44% de la population française.

Calcul :  $1 - [\text{augmentation de l'emport (en \%)}] * [\text{population concernée (en\%)}]$ .

### iii. Modes doux

Grâce à un éveil de la conscience collective et à quelques aménagements liés à la sécurité, les modes doux peuvent encore être favorisés dans les années à venir. Un essor du vélo a d'ailleurs été constaté dans le contexte de crise sanitaire. Leur fréquence dans les déplacements pourrait augmenter de 5%, en sobriété moyenne, à 8% en sobriété forte. Ce coefficient reflète le taux d'utilisation des modes doux par l'opposé, c'est-à-dire la part de déplacements n'utilisant pas les modes doux. Les données exploitées s'appuient sur divers articles scientifiques co-écrits par F. Rudolf. (Obergassel, Lah, et Rudolph, 2021).

Calcul :  $1 - [\text{utilisation des modes doux (en\%)}]$ .

Exemple : Si 8% des déplacements se font grâce aux modes doux, la valeur de ce coefficient est de 0.92.

### iv. Télétravail

On estime que le télétravail et plus généralement les activités à distance vont se démocratiser dans le futur, comme cela a été le cas lors de cette pandémie. D'autant plus que le développement des réseaux 6G et supérieur, en offrant une meilleure bande passante et donc un débit de connexion encore plus

rapide vont permettre de réaliser de plus en plus de tâches à distance (Pärssinens et al., 2021). Les sensations offertes par les dispositifs de réalité virtuelle sont donc amenées à se rapprocher fortement du réel (Hoffman et al. 2020). Il subsiste toutefois un effet rebond puisque le temps économisé en ne se rendant pas sur le lieu d'une activité peut être alloué à d'autres tâches, nécessitant elles aussi des déplacements.

Calcul :  $1 - [\text{part d'actifs qui télétravaillent}] * [\text{temps télétravaillé}] * [\text{effet rebond}]$

#### v. Carte carbone terre

La carte carbone est une autre mesure de sobriété qui peut être mise en place pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub>. Elle s'applique à une tranche de population qui pollue plus que les autres, les hypermobiles. Ici, on considère que les hypermobiles émettent 80% du CO<sub>2</sub> total avant l'application de la taxe carbone. Leurs comportements évoluent ensuite. Ce coefficient prend en compte l'effet de la mise en place d'une telle mesure. Les données utilisées s'appuient sur les travaux réalisés au préalable au sein de l'AQST, D.Verry, J.P. Ceron et G.Dubois.

Calcul :  $[\text{Emission de cette pop après}] + (1 - [\text{Emissions de cette pop avant}])$

Exemple : Si les hypermobiles émettaient 80% du CO<sub>2</sub> avant la mise en place de la carte carbone, et 40% après cette mesure, le coefficient vaut  $0.4 + (1-0.8) = 0.6$

#### vi. Aménagement

Enfin l'aménagement a un impact plus faible, mais surtout moins immédiat que les autres variables, sur les émissions de CO<sub>2</sub>. L'effet de l'aménagement, par des mesures comme la limitation de l'étalement urbain, a un impact sur les mobilités qu'il faut considérer sur le temps long car ils se font peu ressentir après quelques dizaines d'années.

Calcul :  $1 - [\text{effet de l'aménagement (en\%)}]$ .

#### vii. Effet de la taxe carbone terre

L'effet de la taxe carbone qui vaut actuellement 44 euros dépend bien sûr de son niveau de prix, mais aussi, de l'élasticité prix, du prix du litre d'essence et de la quantité de CO<sub>2</sub> dans un litre. Tous ces éléments ont été choisis constants au cours du temps sauf le niveau de prix de la taxe carbone. L'effet de cette taxe se calcule à partir de l'élasticité prix, du facteur de réduction des émissions liés à la motorisation et de l'effet prix. L'ADEME fournit nombre de données à ce sujet (ADEME, 2016).

L'effet prix est en lui-même une variable intermédiaire. Il dépend du prix d'un litre de carburant, de la quantité de CO<sub>2</sub> contenue dans un litre, de la valeur de la taxe carbone et de la réduction des émissions grâce à la motorisation.

Calcul :

$$\text{Effet prix}(t) = \frac{\frac{\text{Niveau taxe}(t)}{\text{Coef motorisation}(t)} - \frac{\text{Niveau taxe}(to)}{\text{Coef motorisation}(to)}}{1000} * \frac{\text{Quantité de CO}_2 \text{ par litre}}{\text{Prix du litre de carburant}}$$

Taxe carbone =  $1 + [\text{Elasticité prix}] * [\text{Effet prix}] * [\text{Niveau taxe carbone}] / 250 * 5.2 * [\text{Coef multiplicatif motorisation}]$ .

5.2 étant le coefficient de réduction maximum espéré à ce jour pour 2060, il peut évoluer et probablement augmenter.

Pour chacune des variables en entrée j'ai réalisé un graphique montrant son évolution au cours du temps dans chacun des scénarios de sobriété. Par exemple pour la valeur de la taxe carbone :

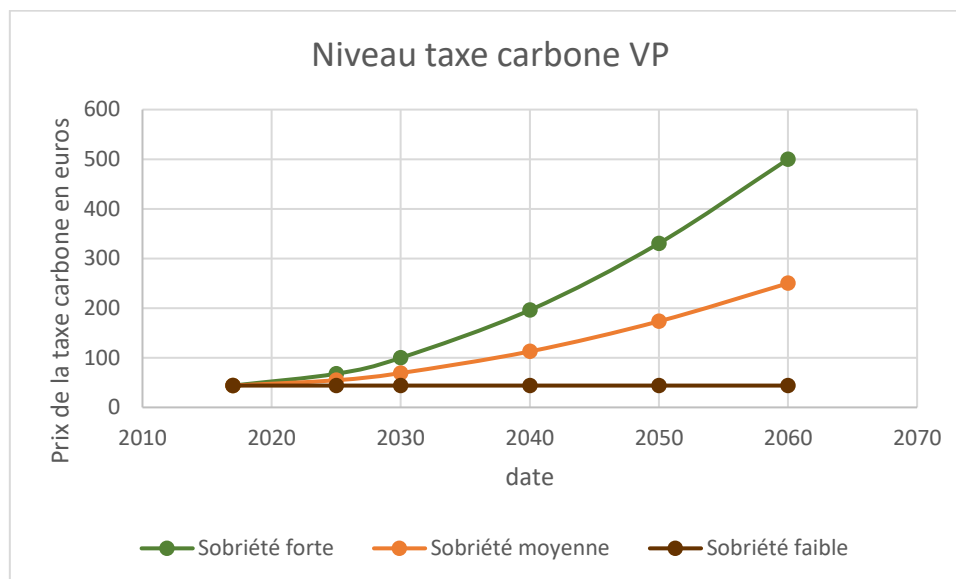


Figure 2/Niveau de la taxe carbone des véhicules particuliers au cours du temps (auteure : C. VALLON)

Puis, j'ai réalisé de même un graphique d'évolution pour chacune des variables intermédiaires, dans tous les scénarios. Pour celui de l'effet de la taxe carbone en sobriété forte, j'ai obtenu le graphe ci-dessous. Les graphiques pour toutes les autres variables de ce modèle voyageurs terrestre ont été effectué de la même manière. La figure ci-dessous est collée à titre d'exemple.

Il est à noter que pour la plupart des variables exogènes nous ne disposons que des données en 2020 et en 2060. Dès lors, sauf indication contraire d'un texte de loi ou d'un article scientifique, nous avons choisi de réaliser une interpolation. Nous avons décidé qu'un tiers des efforts à réaliser sur 2020-2060 le serait sur l'intervalle 2020-2040 et que deux tiers seraient effectué sur 2040-2060. Il serait bon d'effectuer des recherches dans l'avenir pour affiner ces chroniques.

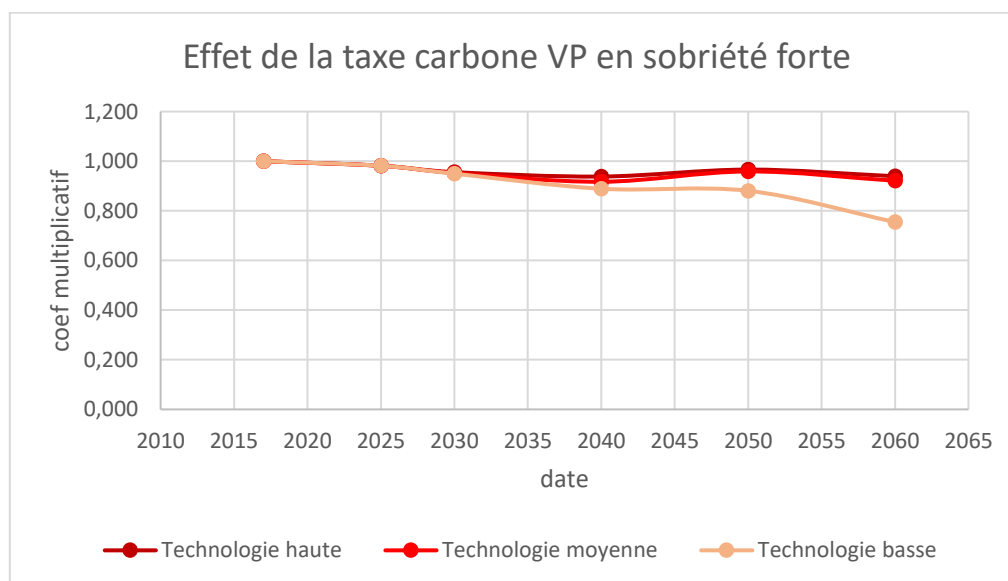


Figure 3/Effet de la taxe carbone des véhicules particuliers au cours du temps (auteure : C. VALLON).

### viii. Coefficient final lié aux politiques de sobriété

Le coefficient multiplicatif lié aux politiques de sobriété est le produit des 7 coefficients expliqués ci-dessus.

Le développement du calcul du coefficient multiplicatif de motorisation, utilisé pour la taxe carbone terre est détaillé ci-dessous, dans la partie dédiée à la motorisation.

#### C) Calcul des variables de motorisation

##### i. Coefficient final de motorisation

Le pourcentage de véhicules électriques en circulation est calculé à partir du pourcentage de vente de véhicules électriques neufs, en prenant compte qu'un véhicule particulier a une durée de vie de 15 ans donc une demi-vie d'environ 7 ans. Dans les scénarios de sobriété forte et moyenne, on considère qu'à partir de 2040, tous les véhicules vendus sont des véhicules électriques. A partir de ces données et en tenant compte de la durée nécessaire au renouvellement du parc automobile, on obtient la part de véhicules électriques en circulation au cours du temps. Le pourcentage de véhicules électriques en circulation à l'année  $n$  vaut ainsi 0.3 fois le pourcentage de VE neufs vendus à l'année  $n$  + 0.7 fois le pourcentage de VE vendus en  $n - 10$ .

A partir de là, le coef multiplicatif de motorisation se calcule comme suit :

Coef = [Pourcentage de VE en circulation] / [Facteur de réduction] + (1 – [Pourcentage de VE en circulation])

Les sources de ces données sont internes et proviennent du groupe de travail dédié à la motorisation, qui est en contact avec les professionnels du secteur pour mieux connaître l'état de développement des nouvelles technologies.

#### D) Output en fonction de la tendance selon le PIB

Le calcul final des chroniques de MtCO<sub>2</sub> eq émis consiste en une multiplication des coefficients multiplicatifs précédemment décrits avec un scénario qui suit la tendance estimée selon le PIB. On distingue les valeurs des déplacements terrestres de la vie quotidienne des déplacements terrestres interurbains.

Le scénario terrestre final est la somme des valeurs obtenues pour la vie quotidienne et l'interurbain. Pour chacune des chroniques on a besoin d'une valeur de départ (Commissariat général du développement durable, 2019) d'une élasticité et des chroniques de PIB et de population. Puis, la formule est la suivante : 
$$v(t + 5) = v(t) * \left( \frac{PIB(t+5)}{PIB(t)} \right)^{elasPIB} * \frac{POP(t+5)}{POP(t)}.$$

On obtient ainsi une tendance de MtCO<sub>2</sub>eq selon le PIB. En la multipliant par les coefficients précédemment obtenus, on arrive à un résultat final.

Il est à noter que les calculs décrits dans les pages précédentes permettent d'aboutir à des chroniques d'émissions de gaz à effet de serre, mais des démarches analogues ont été menée avec les voyageurs-km et les véhicules-km.

### E) Principaux résultats et regard critique

Les principaux résultats ont été rendus sous forme de graphique, présentant les émissions de gaz à effet de serre en millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent selon les scénarios. Je vais coller ici les graphiques finaux des parties voyageurs terrestres, voyageurs aériens et marchandises.

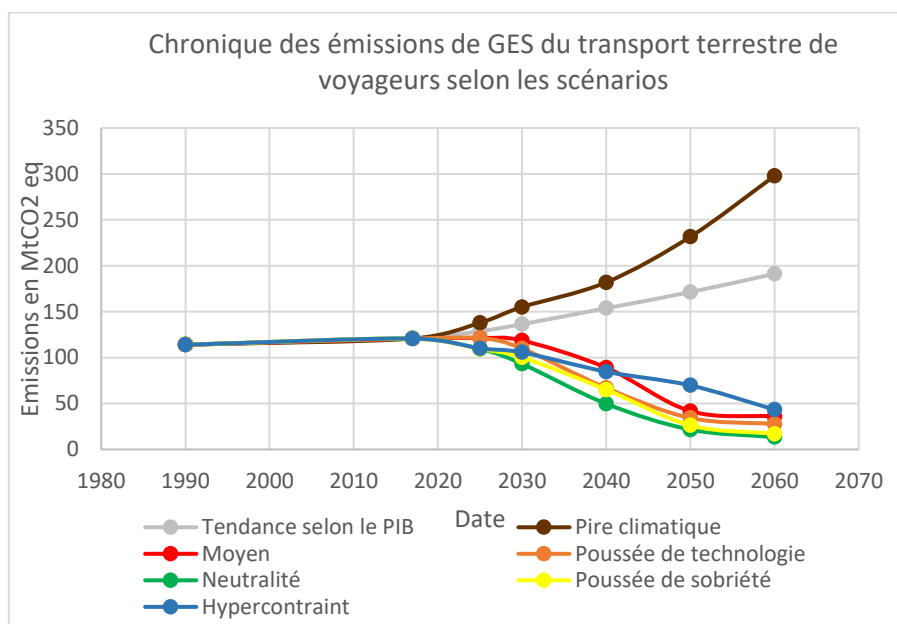


Figure 4/Chronique des émissions du transport terrestre de voyageurs selon les scénarios (auteure : C. VALLON).

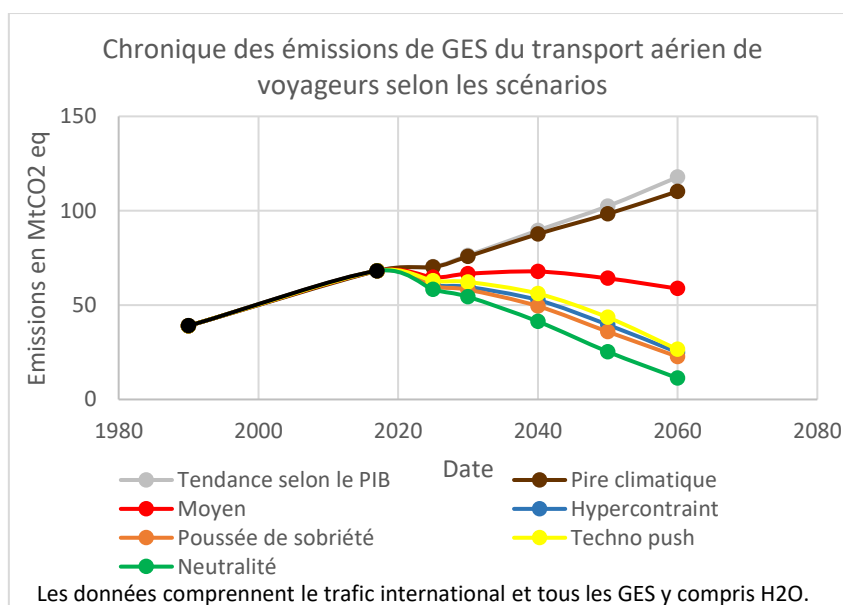


Figure 5/Chronique des émissions du transport aérien de voyageurs selon les scénarios (auteure : C. VALLON).



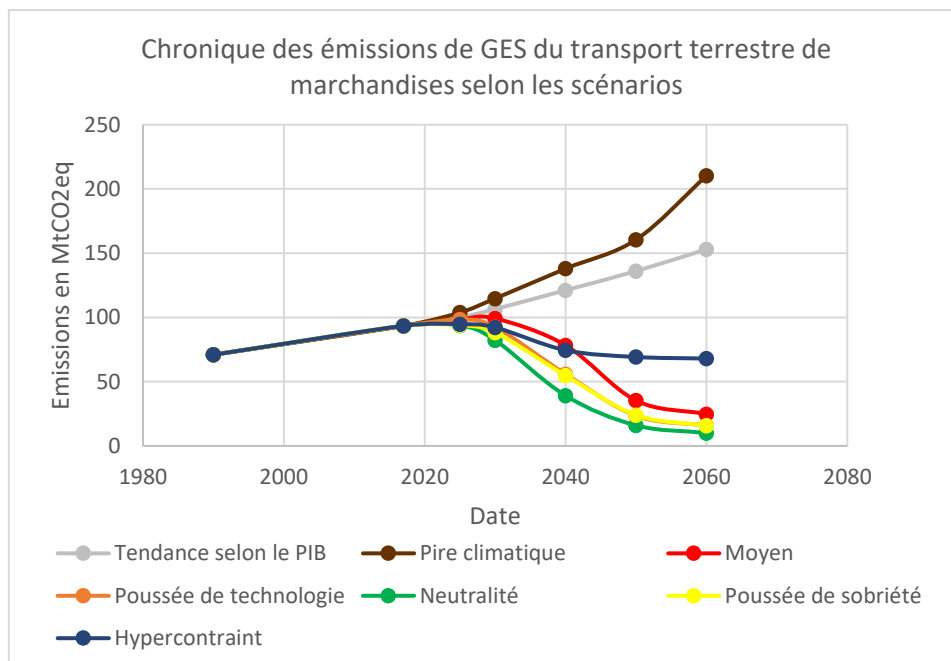


Figure 6/Chronique des émissions du transport terrestre de marchandises selon les scénarios (auteure : C. VALLON).

On constate donc que le scénario de neutralité, dans lequel les efforts maximums sont faits tant en terme de politique de sobriété que de motorisation est le moins émetteur de CO<sub>2</sub>. Viennent ensuite dans le cœur du faisceau, les autres scénarios, nécessitant moins d'efforts, le scénario du pire climatique étant toujours le plus émetteur.

Suite à une réflexion pertinente interne au CGEDD, nous avons choisi de calculer la part relative de chaque variable dans la diminution des émissions. En effet, connaître dans quelle mesure un effort sur la motorisation ou sur la sobriété à une année n fait diminuer les émissions permet de préciser les résultats précédents et ajoutent une information intéressante. J'ai donc effectué les calculs puis j'ai présenté aussi ces résultats sous forme de graphiques en bâton. Voici quelques exemples :

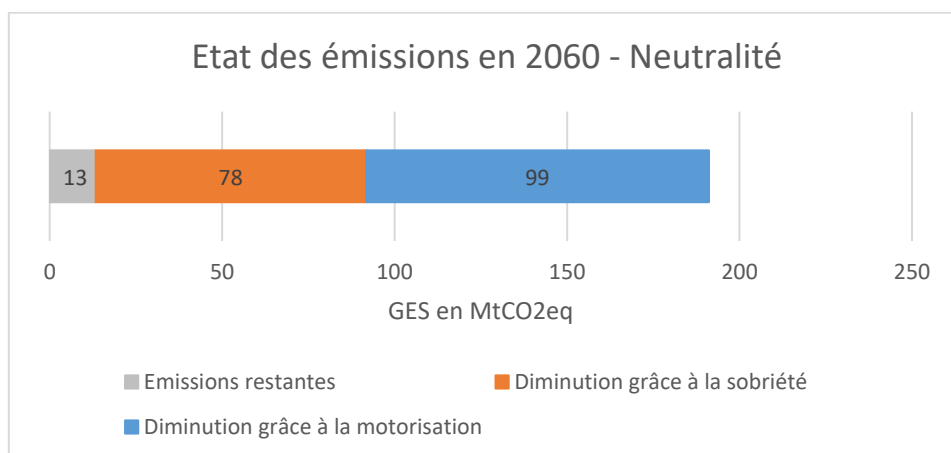


Figure 7/Parts relatives de la sobriété et de la motorisation dans la réduction des émissions (auteure : C. VALLON).

La hauteur totale du bâton nous donne les émissions totales en 2060 dans le scénario tendanciel PIB, elles s'élèvent à 189 MtCO<sub>2</sub>eq. Ce graphique du scénario de neutralité montre qu'en appliquant les mesures « Neutralité », seules 13 MtCO<sub>2</sub>eq sont réellement émises, 99 MtCO<sub>2</sub>eq étant évitées grâce aux efforts sur la motorisation et 78 MtCO<sub>2</sub>eq grâce aux différentes mesures de sobriété. Il est possible de pousser l'analyse encore plus loin en cherchant parmi les variables de sobriété lesquelles sont les

plus efficaces, les plus déterminantes dans la réduction des émissions. Après quelques calculs supplémentaires j'ai obtenu des résultats du type du graphique suivant :

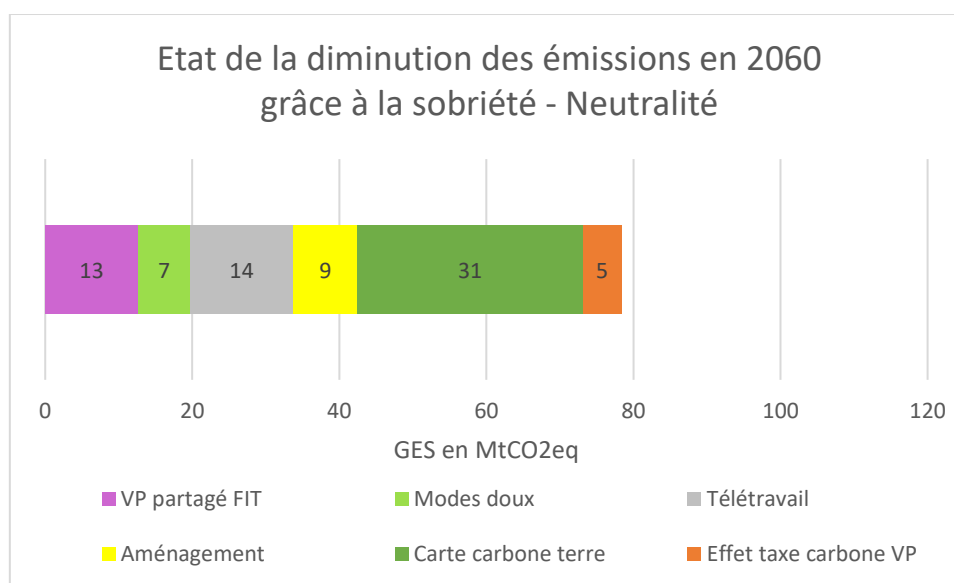


Figure 8/Part des différentes variables de sobriété dans la réduction des émissions (auteure : C. VALLON).

Les calculs menés par la suite nous ont montré qu'il aurait été bon d'envisager un scénario intermédiaire entre celui de Neutralité et le scénario Poussée de technologie. Ce type de scénario aurait pu se révéler plus tard comme étant optimal sous certaines conditions. Enfin lors d'une réunion de travail, il a également été regretté l'absence d'un scénario dans lequel les efforts suffiraient juste à faire stagner les émissions, c'est-à-dire qu'ils permettraient simplement de compenser l'augmentation des émissions induite par la croissance du PIB. Ce sont donc deux types de scénarios qui pourraient être ajoutés au modèle.

## 2. Etude du marché prévisionnel Metaculus

### A) Description de la méthode

On constate qu'il y a des incertitudes à plusieurs niveaux. On ne sait pas jusqu'à quel point il est possible d'éviter au changement climatique. Mais notre capacité à supporter ce changement et celle des autres espèces dépend aussi du rythme de ce réchauffement. A ce sujet, le dernier rapport du GIEC est alarmant sur la vitesse du réchauffement et suggère que nous dépasserons le réchauffement de 1.5 degrés très rapidement si des mesures insuffisantes sont prises. Le pire scénario atteignant même un réchauffement de 5 degrés en 2100, qui cache de fortes disparités entre les régions ((Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et al., 2020). Mais ce réchauffement dépend bien sûr de l'évolution de nos émissions, elle aussi incertaine. D'autre part, on connaît mal les dommages liés à cette hausse de température.

Dans cette situation, avec des incertitudes nombreuses et importantes, l'examen de la dispersion constatée sur des marchés de prévision peut fournir une première approche. Les résultats donnés par un marché prévisionnel peuvent aussi servir d'hypothèses de départ pour des calculs d'incertitudes plus poussés. Dans ce travail, c'est le marché de prévision réputationnel Metaculus qui a été utilisé. Il est principalement à destination d'une communauté scientifique, éveillée aux sujets sur lesquels elle émet un avis.

Le principe de ce marché est le suivant : en réponse à une question posée, une information est proposée, en agrégeant les réponses individuelles selon une méthode utilisant des incitations pour optimiser la pertinence de la réponse apportée. Dans la plupart des cas, une courbe de densité de

probabilité est proposée, avec quelques indicateurs (25% bas, médian, 75% haut, ainsi que des éléments sur les queues de distribution), susceptibles d'être utilisés par exemple dans une démarche de type Monte Carlo, après quelques vérifications de plausibilité. De cette base ont été extraites des réponses à des questions portant soit sur des éléments de contexte généraux, ainsi que sur la question du changement climatique, ainsi que certaines technologies clés des transports (motorisation, conduite autonome, aspects spécifiques).

Metaculus a notamment interrogé ses participants sur la perte de PIB mondial due aux dommages liés au dérèglement climatique en moyenne non actualisée dans le monde sur le XXIème siècle. Cette donnée nous sert de première hypothèse de travail. La question originale posée est « What will be the total damage incurred by climate change during the 21st century? ». La réponse est donc en pourcentage.

Je vais utiliser cet exemple pour expliquer le traitement des données issues de ce site ci -dessous.

Les données sont fournies par Metaculus sous cette forme :

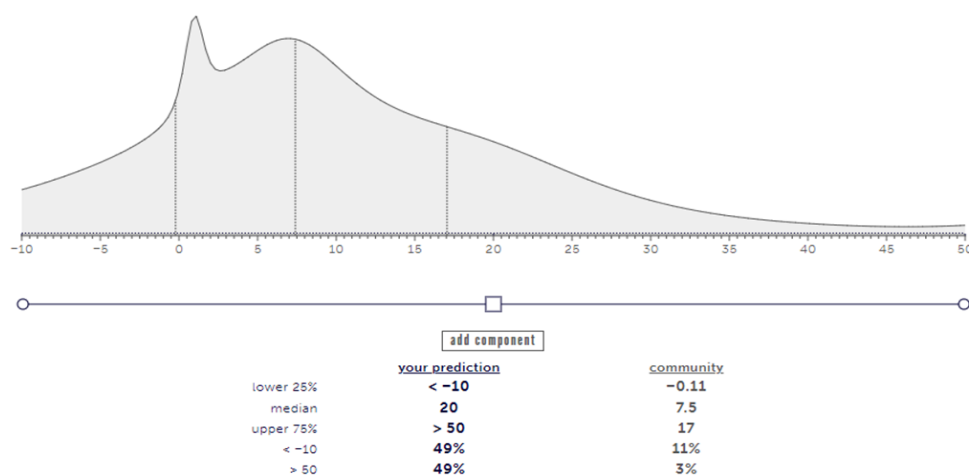


Figure 9/Courbe de répartition des réponses à la question des dommages en perte de PIB sur le siècle. Source: Metaculus.

On connaît aussi le nombre de répondants, qui s'élevait à 28 pour cette question, le jour de la lecture de ce graphe. On constate que les résultats sont très contrastés. En effet la réponse médiane se situe aux alentours de 7% mais la dispersion est très importante. Certains répondants estiment même des dommages négatifs, en considérant que le réchauffement climatique pourrait favoriser la croissance des végétaux. Tandis que d'autres répondent une moyenne allant jusqu'à une trentaine voire une quarantaine de pourcentage du PIB sur le siècle. Ce qui représente environ 80% du PIB de 2100.

On relève les valeurs de cette courbe par pas de 5% dans Excel puis on les centre et les réduit. Les 3% qui répondent une valeur supérieure à 50 ont été lissés sur les courbes qui suivent entre 50 et 100. Les 11% qui répondent que le réchauffement climatique pourrait faire gagner plus de 10% du PIB n'ont pas été pris en compte. Il est possible que le réchauffement climatique accélère la croissance des végétaux et fassent ainsi augmenter légèrement le PIB mais une croissance si importante ne paraît pas vraisemblable.

Les données ainsi remaniées sont comparées à trois lois : la loi log-normale, la loi normale et la loi de Laplace. La comparaison est simple, on place les paramètres de ces lois dans des cellules variables, on choisit des valeurs de départ arbitrairement pour ces paramètres. Par la suite, on calcule la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs calculées grâce à la loi de distribution. Puis grâce au solveur d'Excel on cherche à minimiser cette somme des écarts en faisant varier les paramètres des lois. Enfin, grâce aux paramètres obtenus on calcule l'espérance, l'écart type et la médiane de chacune des distributions obtenues après passage du solveur.

## B) Principaux résultats

On obtient les résultats suivants, qui sont aussi retranscrits sous forme de graphiques.

La loi log normale est celle qui donne les meilleurs résultats pour cette question et qui sera donc utilisée pour la suite des calculs. Les graphiques similaires pour la loi normale et la loi de Laplace sont fournies en annexe 2 et annexe 3 de ce document.

Comparaison à la loi log normale :

Médiane = 7.4

Espérance = 5.50

Ecart type = 12.38

Erreur par la méthode des moindres carrés = 3.70/1000

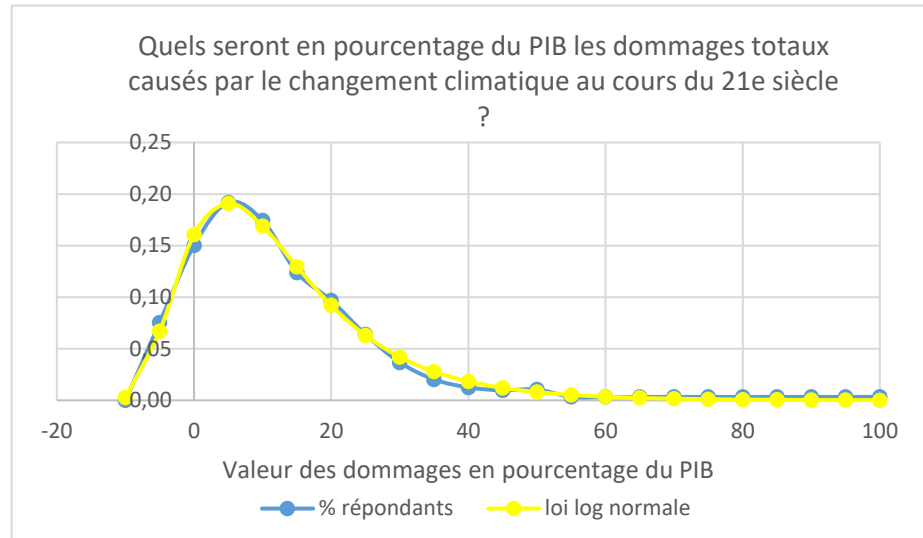


Figure 10/Comparaison entre la loi log normale et la répartition des réponses (auteure : C. VALLON).

Des démarches similaires ont été effectuées, avec des comparaisons aux trois mêmes lois sur des questions diverses. Toutes les questions concernaient toutefois la pollution atmosphérique, le développement de nouvelles motorisations ou technologies dans les transports ou encore la vitesse de déploiement de certaines politiques.

## 3. La recherche d'un optimum entre les coûts des dommages et les coûts d'évitement

Les résultats obtenus sur Metaculus à la question des dommages en perte de PIB en moyenne sur le 21ème siècle sont à la base de la troisième tâche, le calcul des incertitudes depuis le modèle précédent. Dans un premier temps, la démarche de modélisation des incertitudes a été effectuée uniquement sur le modèle de transport de voyageurs terrestres, présenté en IV.1.

L'analyse de la dispersion des réponses de Metaculus a permis la modélisation sur Excel de valeurs aléatoires de dommages exprimés en perte de PIB, en suivant la courbe de répartition donnée par Metaculus.

### A) Distribution des dommages en pourcentage de perte de PIB

En effet, entre actuellement 2020 et 2100, par pas de cinq ans, le tirage au sort d'un incrément  $X(t)$  entre -1 et +1 est effectué. Il est ensuite multiplié par un coefficient de calage  $a$ , donc  $a \cdot X(t)$  tous les 5 ans et un autre coefficient de calage  $b$  ( $a$  et  $b$  sont fixes dans le temps).

On obtient :  $z(t+5) = (z(t)) + a \cdot X(t) + b$

Les dommages  $z$  sont exprimés en pourcentage du PIB sur le 21ème siècle en moyenne non pondérée. Le temps  $t$  est exprimé en années. Pour tout  $t$ , on choisit le maximum entre  $z(t)$  et 0 afin que les valeurs

de  $z(t)$  soient toutes positives à ce stade. Une valeur  $z(t=2020)$  de départ est choisie. Tous les résultats de ce premier parcours sont donc compris entre 0 et  $z(t=2020) + 16*(a + b)$ . Voici un exemple de dix premières lignes d'une version du tableur (qui varie avec les tirages au sort).

2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095	2100
7,08	8,88	10,20	10,09	9,48	9,06	9,60	9,06	10,43	12,03	12,94	14,42	12,59	10,41	12,24	14,24	15,44
7,08	9,19	9,72	10,92	10,80	13,42	13,90	14,87	13,88	12,67	14,73	13,37	12,13	11,94	11,53	11,02	10,14
7,08	4,93	6,98	9,17	11,24	11,06	10,30	8,06	9,97	12,49	12,76	14,17	15,21	16,18	14,39	16,13	16,82
7,08	5,96	6,09	5,70	3,63	5,65	7,86	8,10	9,18	8,36	9,64	10,82	11,11	10,83	9,10	7,82	10,39
7,08	9,65	7,91	8,75	10,53	12,43	12,42	11,90	10,58	12,20	13,22	13,66	16,06	17,58	17,58	19,90	20,87
7,08	8,75	8,30	9,53	8,24	9,61	11,66	11,99	13,62	14,33	12,29	11,48	10,41	11,63	10,51	9,61	8,55
7,08	8,66	10,38	12,60	13,52	14,04	16,65	17,46	17,89	15,74	14,62	16,10	14,40	17,03	18,07	19,39	17,07
7,08	6,09	6,59	7,62	6,15	4,40	3,25	1,42	0,30	0,00	1,54	0,00	0,00	0,00	1,38	2,92	1,33
7,08	8,39	6,14	5,68	4,03	5,09	4,83	6,53	6,86	5,47	6,86	5,86	4,05	4,61	7,22	4,94	7,45
7,08	7,04	5,63	4,30	4,49	4,17	4,59	4,85	5,52	6,97	6,95	4,83	5,43	4,18	1,87	3,18	4,07

Tableau 4/Exemple de dix lignes issues de la première étape de calcul.

On passe ensuite chacune des valeurs de  $z(t)$  à un exposant  $e$  constant. Et on introduit un coefficient constant  $c$ . Ce coefficient  $c$  permet de tirer les valeurs vers le bas et son importance augmente au cours du temps. On a ainsi :

$$y(t) = (z(t)^e) - c*(t - 2020)/(2100 - 2020)$$

Le dernier terme est donc nul en 2020, il vaut  $-1/2*c$  en 2060 et  $-c$  en 2100.

Les valeurs de la colonne  $y(t=2100)$  ainsi obtenues sont comparées avec la loi de répartition des dommages mondiaux en % du PIB mondial en moyenne d'ici 2020, donnée par Metaculus. La comparaison est faite par la méthode des moindres carrés qui donne des résultats satisfaisants même s'ils sont légèrement variables selon le tirage au sort de  $X(t)$ . En minimisant la somme des moindres carrés, le solveur nous propose des valeurs pour les coefficients nommés ci-dessus :

$$a = 2.503 ; b = 0.153 ; c = 4.977 ; d = z(t=2020) = 7.081 ; e = 1.205$$

Pour tout  $t$ , on calcule le coefficient de détermination  $R^2$  (ligne en bleu sur la figure ci-dessous) entre les valeurs de la colonne  $y(t)$  et les valeurs de la colonne  $y(t=2100)$ . On constate que la valeur de  $R^2$  augmente progressivement, de façon quasi linéaire, quand la valeur de  $t$  augmente. Ceci montre que la tendance des dommages se dessine progressivement au fil du temps et qu'on peut donc savoir quelques dizaines d'années à l'avance si le scénario qui se profile est convenable ou s'il est urgent d'agir fortement. La figure ci-dessous présente 10 chroniques de dommages en pourcentage de PIB et en moyenne sur le siècle et les coefficients  $R^2$  associés.

0,00	0,06	0,11	0,16	0,21	0,28	0,36	0,42	0,47	0,54	0,60	0,67	0,73	0,79	0,87	0,93	1,00
$y(n)=(z(n)^e)+\text{tendance temporelle}$																
2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095	2100
10,6	13,6	15,8	15,3	13,8	12,7	13,4	12,0	14,4	17,2	18,7	21,5	17,4	12,8	16,1	19,9	22,1
10,6	14,2	14,9	16,9	16,3	21,3	22,0	23,7	21,3	18,5	22,4	19,3	16,5	15,8	14,7	13,4	11,3
10,6	6,5	9,8	13,5	17,2	16,5	14,7	10,2	13,5	18,1	18,4	21,0	22,8	24,6	20,5	23,8	25,0
10,6	8,3	8,2	7,2	3,5	6,5	10,1	10,3	12,0	10,1	12,2	14,2	14,5	13,6	9,9	7,3	11,8
10,6	15,0	11,5	12,7	15,8	19,3	18,9	17,6	14,7	17,6	19,3	19,9	24,6	27,6	27,3	32,0	33,9
10,6	13,3	12,2	14,2	11,5	13,7	17,4	17,8	20,8	21,9	17,4	15,5	13,1	15,2	12,7	10,6	8,3
10,6	13,2	16,1	20,2	21,8	22,6	27,8	29,2	29,8	24,9	22,2	25,0	21,1	26,4	28,3	30,9	25,6
10,6	8,5	9,1	10,6	7,7	4,4	2,3	-0,7	-2,2	-2,8	-1,4	-3,4	-3,7	-4,0	-2,9	-1,0	-3,6
10,6	12,7	8,3	7,2	4,1	5,5	4,8	7,4	7,7	5,0	7,1	5,0	1,7	2,3	6,5	2,2	6,3
10,6	10,2	7,4	4,9	4,9	4,0	4,4	4,5	5,3	7,6	7,2	3,2	3,9	1,6	-2,2	-0,6	0,5

Tableau 5/Exemple de dix lignes après la seconde étape de calcul.

Ces résultats ainsi que les valeurs obtenues dans le modèle statique de transport de voyageurs terrestres sont utilisés dans la suite du modèle présentée ci-dessous. Son but est de chercher la politique qui conduit à un optimum économique entre les coûts des dommages et les coûts d'évitement en perte de PIB sur le siècle (Sauvant).

#### B) Liens entre émissions de gaz à effet de serre et décision publique

Ce modèle suppose quelques principes fondamentaux énoncés ci-dessous, qui permettent de simplifier les calculs pour cette première approche.

Seulement quatre types de décisions publiques peuvent être prises, dont trois dans le secteur des transports, et une relative aux émissions négatives. On considère que les décisions sont prises tous les cinq ans entre 2020 et 2060. On suppose un unique décideur public dans une seule zone géographique, et on ne considère que les dommages liés aux émissions de la mobilité, en supposant une proratisation comme les émissions actuelles, soit en France environ 40% de l'ensemble des émissions de GES (transport international et tous GES, en analyse en cycle de vie).

Les décisions de type 1 concernent la décarbonation des motorisations, les émissions de type 2 sobriété à effet de court terme. Ce sont par exemple le signal prix sur la mobilité, ou le partage de voirie aux fins d'encouragement de massification. Les décisions de type 3 portent sur la sobriété à effet de long terme, qui est essentiellement constituée de mesures liées à l'aménagement du territoire et aux infrastructures de transport. Enfin, les décisions de type 4 sont liées à la production d'émissions négatives, c'est-à-dire à la possibilité de retirer du dioxyde de carbone de l'air (carbon dioxide removal) dont un prototype existe au Maroc.

Avec les chroniques d'émissions obtenue dans le modèle voyageurs terrestres il a donc fallu déduire, pour chaque scénario (Pire, Moyen, Neutralité), trois chroniques d'émissions  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  tels que leur produit nous renvoie à la valeur trouvée dans l'output final du modèle voyageurs terrestres. Les valeurs  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  ont été déterminées selon les variables du modèle voyageurs en tenant compte des définitions précédentes des types 1,2, et 3. Ces quatre chroniques d'émissions ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ) nous permettent de déduire les quatre chroniques de politique ( $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$ ) qui leur correspondent grâce aux formules :

$$x_1(t+5) = x_1(t) - k_1 \cdot u_1(t) ; x_2(t+5) = x_2(t) - k_2 \cdot u_2(t) \quad (1)$$

$$\text{La troisième variable est cumulative et s'écrit donc : } x_3(t+5) = x_3(t) - k_3 \cdot (u_3(t=0) + \dots + u_3(t)) \quad (2)$$

Elle est aussi normalisée égale à 1 en 2020 pour simplifier les calculs et la détermination de  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ .

La quatrième variable, qui comptabilise les émissions négatives, n'est pas déterminé par les résultats du modèle précédemment décrit. Des valeurs de CO<sub>2</sub> capturées en MtCO<sub>2</sub>eq en 2060 m'ont été donné pour chacune des trois politiques de sobriété. A partir de ces valeurs pour l'année 2060, on considère à nouveau qu'un tiers des efforts sont faits avant 2040 et deux tiers après et on en déduit une chronique. Cette variable tend à augmenter au cours du temps puisque cette technologie est aujourd'hui peu développée. Le signe dans la formule est donc changé et on obtient pour la formule liant la variable d'état des émissions  $x$  à la variable de politique  $u$  :  $x_4(t+5) = y_4(t) + k_4 \cdot u_4(t)$ .

Il est à noter que par la suite, pour simplifier les calculs de l'optimum, les émissions négatives  $x_4$  seront supposées identiques dans tous les scénarios (de Pire climatique à Neutralité).

C) Des valeurs pour les scénarios « repères » issues du modèle précédent...

Ces valeurs de  $u$  qui quantifient la sévérité des politiques adoptées permettent de déduire les coûts de ces mesures, nommé coût d'évitement,  $cg$ , en trouvant d'abord deux constantes,  $kcg$  et  $e$ , pour chaque type de politique. Puis en appliquant la formule suivante pour chaque type 1, 2, 3 et 4 :  $cg(t) = kcg * (u(t)^e)$ . Aussi, on pose après 2060 des coûts d'évitement  $cge$  stagnants ainsi que des émissions stagnantes. En effet il est supposé qu'en 2060 les coûts d'évitement restants sont majoritairement des pertes de temps (dû à du covoiturage forcé par exemple) et que les pertes sont donc constantes, pour obtenir des émissions constantes.

Pour fixer par exemple les constantes  $kcg1$  et  $e1$ , il faut des valeurs de  $x1$  dans trois scénarios, celui de Neutralité, le scénario moyen et enfin celui du pire climatique. Il faut également des valeurs de coût généralisé cible. Il suffit ensuite d'implémenter le calcul de  $cg$  grâce aux valeurs connues de  $u$  et à des valeurs arbitraires choisies pour  $e$  et  $kcg$ . On calcule ainsi une différence par la méthode des moindres carrés entre les valeurs de  $cg$  obtenues avec les constantes choisies arbitrairement et les valeurs cibles de  $cg$ . Finalement l'objectif est donc de minimiser cette différence pour rapprocher les valeurs obtenues des valeurs cibles. Cela se fait grâce au solveur d'Excel, qui fait donc tendre la différence des moindres carrés vers 0 en modifiant les valeurs de  $kcg$  et  $e$ . Cette méthode permet d'obtenir les résultats suivants :

$kcg1 = 372.5$  ;  $kcg2 = 2.77E-30$  ;  $kcg3 = 98000$  ;  $kcg4 = 0.056$  ; et  $e1 = 1.26$  ;  $e2 = 17.43$  ;  $e3 = 1.76$  ;  $e4 = 0.52$  ;

Mais la valeur de ces constantes dépend donc des valeurs cibles de  $cg$ . Il convient donc de s'intéresser à la manière dont ces valeurs cibles ont été définies. Ces coûts généralisés sont en fait des coûts socio-économiques, associées à des politiques, par période, qui sont souvent des pertes de temps. Au moyen d'une valeur du temps, il est donc possible de se ramener à des pertes en pourcentage de PIB, d'abord sur la période, puis en moyenne non pondérée sur le XXIème siècle, de manière à comparer les ordres de grandeur des coûts.

D) ... et pour les scénarios RCP du GIEC

Par lecture du graphe ci-dessous, issu du rapport AR5 du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Pachauri, et Meyer 2015), on obtient des chroniques d'émissions de GES cumulées en GtCO<sub>2</sub>eq, dans le monde et pour tous les secteurs, dans le périmètre de Kyoto.

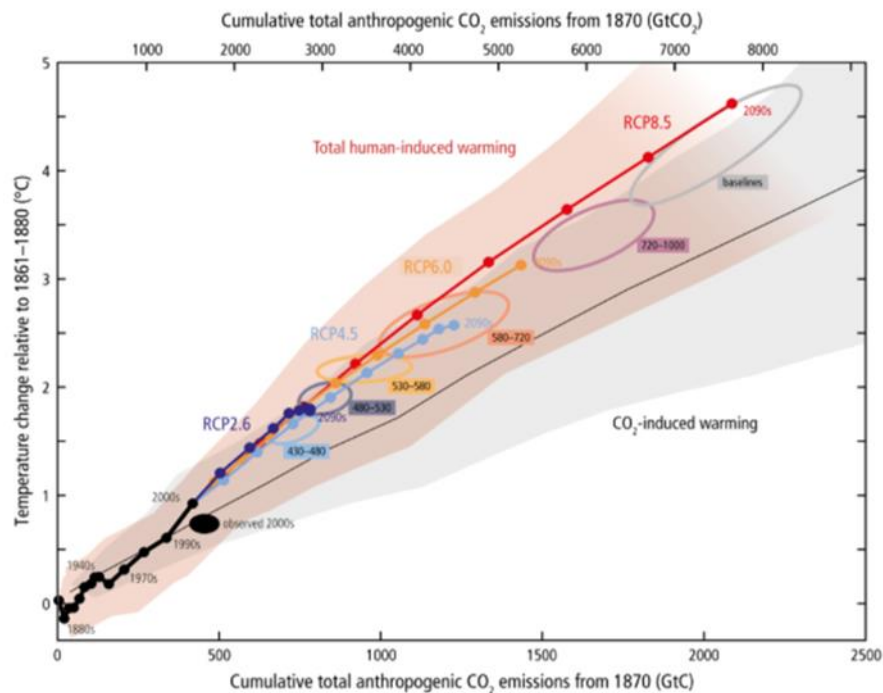


Figure 11/Réchauffement et émissions cumulées en fonction du temps. Source : GIEC AR5.

Ces émissions peuvent ensuite être converties en émissions nettes annuelles du transport de voyageurs terrestres français total (dans et hors Kyoto) grâce à des produits en croix successifs. En effet, on sait que le secteur des transports représente 40% des émissions en France dont environ 2/3 pour les voyageurs parmi lesquels 2/3 pour les voyages terrestres.

On trouve sur le site du gouvernement les chiffres clés du climat (Commissariat général au développement durable, 2020) qui permettent d'établir un coefficient de proportionnalité entre les émissions mondiales et les émissions françaises, de l'ordre de 1/107. Il faut ensuite corriger cette proportionnalité (qui est selon le périmètre de Kyoto) pour obtenir un total, ceci implique la multiplication des données recueillies par un facteur 2 environ.

Une fois ces règles de trois effectuées on obtient donc, pour chacun des scénarios RCP du GIEC, une chronique des émissions nettes annuelles du transport de voyageurs terrestres français. Ces données peuvent être rapprochées des données obtenues dans le modèle voyageurs terrestres et on peut ainsi dresser une courbe :



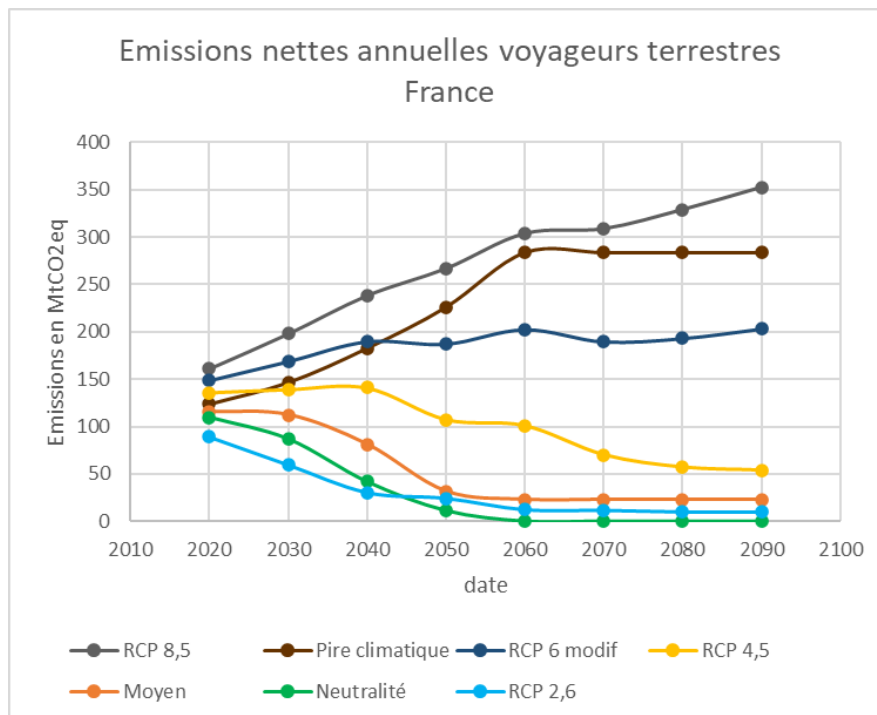


Figure 12/Emissions nettes annuelles dues aux voyageurs terrestres selon les scénarios (auteure C. VALLON).

Ainsi on observe que tous les scénarios sont assez proches en 2020 puis tendent à se différencier les uns des autres au cours du temps. En effectuant la moyenne des données sur le siècle, on en déduit un ordre dans lequel il convient de placer les scénarios : RCP 2.6 < Neutralité < Moyen < RCP 4.5 < RCP 6 modif < Pire climatique < RCP 8.5. Le scénario RCP 6 est appelé ici « RCP 6 modif » car il est choisi comme la moyenne des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Le véritable scénario « RCP 6 mesuré » du GIEC émettant moins de GES que le scénario RCP 4.5 sur l'intervalle 2020-2060, cela aurait pu perturber les calculs suivants.

Pour la suite des calculs, on exprime chacun des scénarios RCP du GIEC comme une combinaison linéaire des scénarios du modèle statique de voyageurs terrestres. Les scénarios RCP 6 et RCP 4.5 sont donc exprimés comme une combinaison linéaire des scénarios Moyen et Pire climatique. Le scénario RCP 8.5 est exprimé en fonction du Pire climatique au moyen d'un coefficient de proportionnalité. Le scénario RCP 2.6 est exprimé en fonction du scénario de Neutralité au moyen d'un autre coefficient de proportionnalité.

$RCP\ 8.5 = a \cdot \text{pire}$  ; avec  $a = 1,072$ .  $RCP\ 6 = b \cdot \text{moyen} + (1-b) \cdot \text{pire}$  ; avec  $b = 0,31$ .  $RCP\ 4.5 = c \cdot \text{moyen} + (1-c) \cdot \text{pire}$  ; avec  $c = 0,70$ .  $RCP\ 2.6 = d \cdot \text{neutralité}$  ; avec  $d = 0.86$ .

Les coefficients précédents sont calculés pour que les valeurs d'émissions en 2060 obtenues par combinaison linéaire soient les mêmes que les valeurs de 2060 mesurés. Le choix de ces combinaisons linéaires dénature légèrement les chroniques originales mesurées dans le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et al., 2015) mais permettent de simplifier les calculs par la suite.

En effet, étant donné que les valeurs de  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  et  $x_4$  ont été déterminé précédemment pour les scénarios Pire climatique, Moyen et Neutralité, il suffit d'utiliser les coefficients de proportionnalité  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  ci-dessus pour en déduire les valeurs des émissions nettes annuelles  $x$  pour les scénarios RCP du GIEC.

E) Des émissions aux dommages en passant par le réchauffement

Puis à partir des émissions annuelles, on calcule les émissions cumulées. Elles permettent de déduire le réchauffement grâce à la figure 11 (p.20). En effet, à partir de points relevés sur la figure 11, il est possible de tracer le graphique suivant.

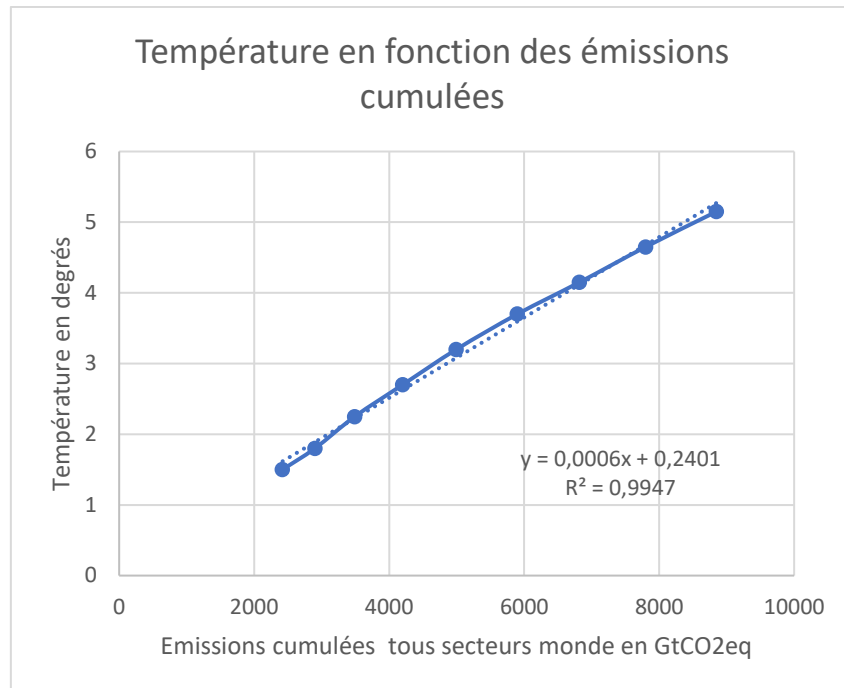
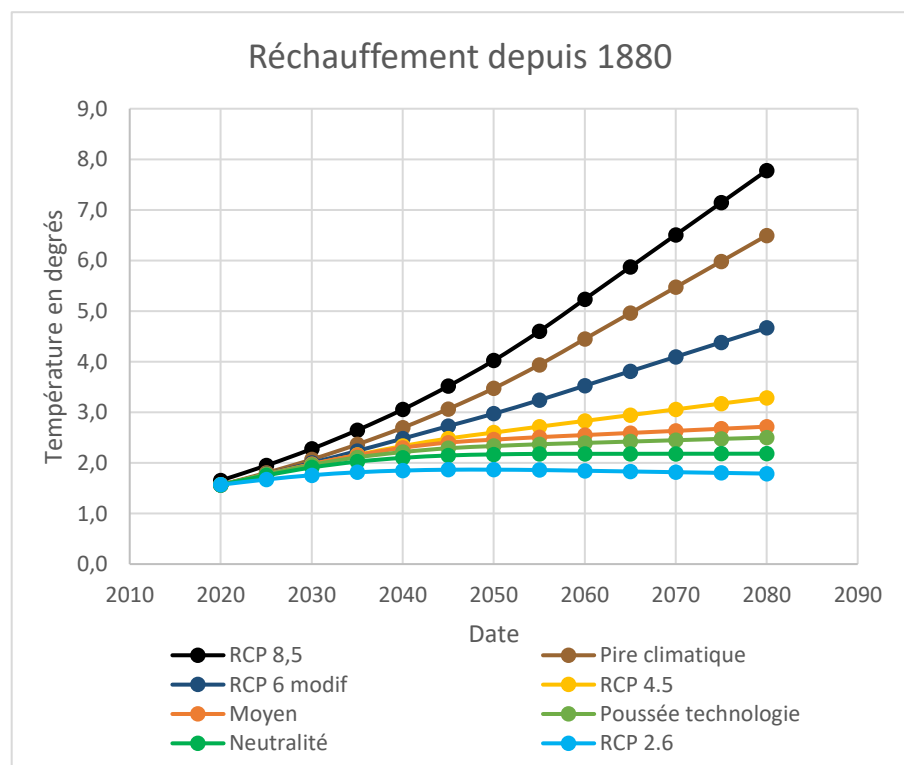


Figure 13/Réchauffement en fonction des émissions (auteure C. VALLON)

Puis, on effectue une régression linéaire sur ces points pour connaître le coefficient directeur (0.0006) et l'ordonnée à l'origine (0.2) de cette droite. Ces deux coordonnées sont utilisées, avec les émissions cumulées obtenues dans chacun des scénarios pour en déduire des températures instantanées dans chaque scénario.

Figure 14/Réchauffement selon les scénarios (auteure : C. VALLON)



Par la suite, grâce aux informations données par Nordhaus dans « Revitalizing social cost of carbon » (Nordhaus, 2016), il est possible de déduire une fonction quadratique qui fournit le coût des dommages en pourcentage de PIB en fonction de la hausse de température en degrés.

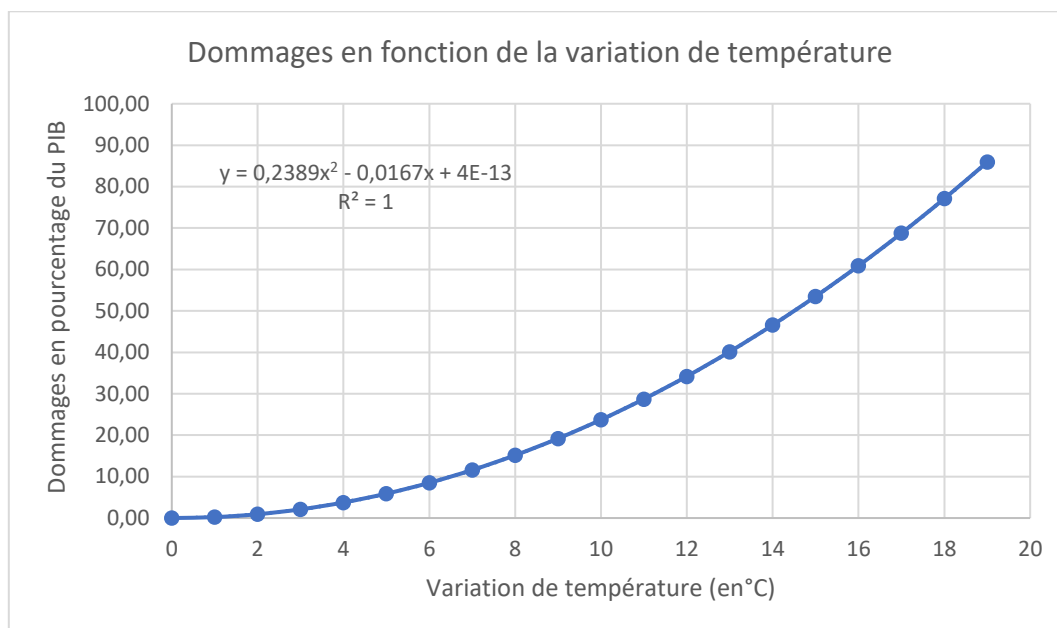


Figure 15/Fonction quadratique des dommages en fonction du réchauffement (auteure : C. VALLON, d'après Nordhaus)

Cette courbe permet donc d'obtenir, à partir des températures, des dommages en pourcentage de PIB. Ces dommages restent inférieurs à 3% du PIB dans quatre des scénarios. En revanche, ils atteignent 22% du PIB en 2100 dans le pire scénario. Le graphique ci-dessous illustre ces disparités. Il est à noter que les incertitudes, dans ce travail, se concentrent sur les dommages causés par le réchauffement c'est-à-dire que celles induites par la fonction quadratique de Nordhaus. Ces chroniques de dommages sont donc à envisager avec prudence.

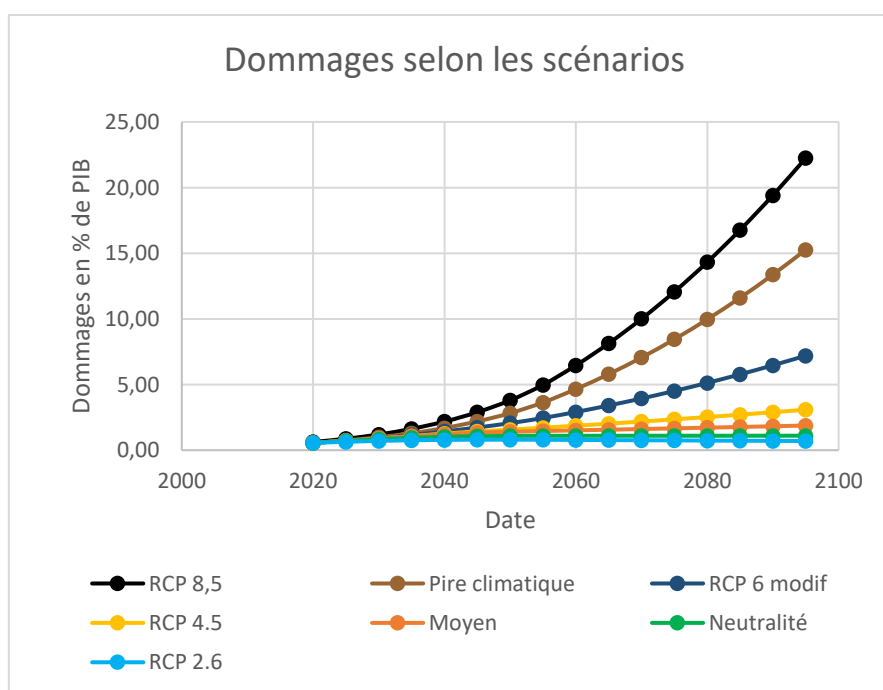


Figure 16/Dommages en perte de PIB selon les scénarios (auteure : C. VALLON)

Nous obtenons donc une chronique de dommages en pourcentage de PIB pour chaque scénario.

Afin de trouver l'optimum économique, il faut désormais calculer des coûts d'évitement. Grâce aux chroniques des dommages obtenues soit par le modèle statique (Pire climatique, Moyen, Neutralité) soit par combinaison linéaire de ces derniers (RCP du GIEC) et aux formules (1) et (2), ces coûts sont facilement calculés.

On somme alors le coût des dommages et le coût d'évitement à chaque instant et dans chaque scénario. A un instant  $t$ , on peut alors connaître la politique la plus appropriée en observant celui pour lequel cette somme est minimale. Après quelques calculs de moyenne, on obtient ainsi qu'en moyenne sur 2020-2060, la meilleure politique est celle du Pire climatique (annexe 4). En effet, si l'on n'imagine pas de futur 2060, si le monde s'arrêtait en 2060, alors le meilleur des choix est de ne pas faire d'effort pour le climat, puisque les dommages ne seront pas très importants. Cependant, si on regarde un horizon à plus long terme, et que l'on décide de regarder la meilleure politique sur le siècle, entre 2020 et 2100 (annexe 5), il apparaît que c'est celle du RCP 4.5 du GIEC, suivie de près par le scénario de Poussée technologique. Enfin si l'on suppose ces coûts constants après 2060 et que l'on cherche la meilleure politique à appliquer sur les trois siècles à venir, c'est le scénario de Poussée technologique qui est l'optimum (annexe 6).

#### F) Introduction d'un facteur d'incertitudes

Comme nous l'avons signalé précédemment, la fonction quadratique de Nordhaus (fig. 15) est une source d'incertitudes. C'est pourquoi nous intégrons un facteur  $K$  qui représente la sous-estimation ou la surestimation des dommages. Un facteur  $K=1$  signifie que la fonction quadratique de Nordhaus est exacte. Un facteur  $K=2$  signifie qu'en réalité les dommages sont deux fois plus importants à une température de réchauffement donnée. Les  $K$  sont obtenus à partir des résultats du tableau 5, divisés par la médiane de 7% fournie par Metaculus. Ils ont donc un caractère aléatoire. On considère que  $K$  change par pas de 10 ans, entre 2020 et 2090. On effectue 10 runs avec à chaque fois des valeurs de  $K$  instantanées tirées au sort. Dans chacun des runs, on calcule le résultat de  $cge + K^* cgd$ . C'est-à-dire le coût d'évitement additionné à  $K$  fois le coût des dommages. On effectue ce calcul pour les scénarios précédemment établis (Pire climatique, RCP6, 4.5, Poussée de technologie et Neutralité). Pour un même scénario, les valeurs de  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  et  $u_4$  sont donc fixes dans tous les runs. Le résultat final de  $cge + K^* cgd$  varie en fonction de  $K$ .

Mais on cherche aussi à créer des scénarios optimisés. Comme déclaré précédemment, si la fonction de Nordhaus est juste ( $K=1$ ) alors le scénario optimal sur 2020-2060 est le pire climatique, le scénario optimal sur le siècle est le RCP 4.5 et le scénario optimal sur trois siècles est Poussée technologique. En faisant varier  $K$ , on cherche les valeurs pour lesquels un nouveau scénario, dans notre faisceau, devient optimal. On trouve les résultats suivants :

a) en optimisant en moyenne 2020-2060 (politique de moyen terme)

- $K(t)$  entre 0 et un 1.60 : pire climatique (annexe 4)
- $K(t)$  entre 1.60 3.97 : RCP 6 modif
- $K(t)$  entre 3.97 et 13.50 : RCP 4.5 (annexe 7)
- $K(t)$  entre 13.5 et 65 : poussée technologique
- $K(t)$  au-delà de 65 : neutralité

b) en optimisant en moyenne sur le siècle (politique de long terme)

- $K(t)$  entre 0 et 2.05 : RCP4.5 (annexe 5)

- K(t) entre 2.35 et 65 : Poussée technologique (annexe 8)
- K(t) au-delà de 65 : Neutralité

c) en optimisant en moyenne sur trois siècles (politique de très long terme)

- K(t) entre 0 et 65 : Poussée technologique (annexe 6 et 9)
- K(t) au-delà de 65 : Neutralité

Sur le tableur Excel, il faut alors utiliser une fonction SI() à plusieurs conditions pour que les trois scénarios dits optimisés retournent la politique qui convient le mieux selon les valeurs de K tirée au sort.

Exemple sur un run « K(2020) = 1.49 ; K(2030) = 2.11 ; K(2040) = 5.62 ; K(2050) = 1.17 » : en optimisant sur la moyenne 2020-2060, on applique la politique de pire climatique entre 2020 et 2029, puis le RCP 6 entre 2030 et 2039 puis le RCP 4.5 entre 2040 et 2049 puis à nouveau les valeurs de u du pire climatique.

On applique les trois méthodes d'optimisation a), b) et c) sur 10 runs et on compare les résultats des scénarios optimisés avec les résultats des scénarios fixes. On constate que les scénarios optimisés ne fournissent pas toujours la politique optimale, c'est-à-dire le minimum de  $cge + K^* cgd$ . Néanmoins, ils ne sont jamais loins de ce minimum. Pour une comparaison plus efficace, dans chaque run et pour chaque type d'optimisation, on fait apparaître le minimum de  $cge + K^* cgd$ . Puis on calcule les différences entre les divers scénarios, optimisés et fixes, et ce minimum. Plus cette différence est grande, moins la politique s'avère adaptée aux valeurs de K tirées au sort.

On peut voir un exemple sur le tableau ci-dessous. L'ordre des scénarios de haut en bas étant Pire climatique, RCP 6, RCP 4.5, poussée technologique, optimisé sur 2020-2060, optimisé sur le siècle et enfin optimisé sur 300 ans. Les trois lignes en vert pâle représentent les trois scénarios optimisés. Les trois cellules en vert plus soutenues sont celles supposées être optimales.

cge+K1(t)*cgd	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095		moy 20-60	moy siècle	moy 300 ans
1,16	1,39	1,65	1,98	3,18	3,84	5,71	6,93	6,94	8,47	12,72	15,91	22,49	28,22	55,83	69,65			3,23	15,38	51,56
1,18	1,64	2,59	2,89	4,45	4,96	4,90	5,64	5,35	6,16	8,73	10,43	14,15	17,18	32,93	40,22			3,53	10,21	30,22
1,21	2,00	4,02	4,29	6,41	6,77	4,10	4,43	3,93	4,22	5,53	6,17	7,81	8,96	16,12	18,85			4,15	6,55	14,75
1,24	3,20	5,63	5,86	8,15	8,39	4,69	4,79	4,24	4,28	4,97	5,12	5,79	6,07	9,16	9,85			5,24	5,71	8,47
1,16	1,39	1,66	1,98	3,19	3,85	5,54	6,77	5,94	7,36	11,38	14,36	20,57	25,94	52,10	65,16			3,19	14,27	48,19
1,21	2,00	4,02	4,29	6,41	6,77	4,10	4,43	3,93	4,22	5,53	6,17	7,81	8,96	16,12	18,85			4,15	6,55	14,75
1,24	3,20	5,63	5,86	8,15	8,39	4,69	4,79	4,24	4,28	4,97	5,12	5,79	6,07	9,16	9,85			5,24	5,71	8,47

Tableau 6/Exemple d'un run avec une chronique de K

				Calcul des différences au min
	moy 20-60	moy siècle	moy 300 ans	moy 20-60 moy siècle moy 300 ans
	3,23	15,38	51,56	0,04 9,67 43,09
	3,53	10,21	30,22	0,34 4,50 21,75
	4,15	6,55	14,75	0,96 0,84 6,28
	5,24	5,71	8,47	2,05 0,00 0,00
	3,19	14,27	48,19	0,00 8,56 39,72
	4,15	6,55	14,75	0,96 0,84 6,28
	5,24	5,71	8,47	2,05 0,00 0,00
min	3,19	5,71	8,47	

On remarque alors les cases en vert soutenu ne correspondent pas toujours au minimum. Elles en sont toutefois proches. En réalisant la moyenne des différences de chaque scénario sur les 10 runs, on se rend compte de l'intérêt des politiques optimisées. En effet, même si les scénarios fixes sont parfois légèrement meilleurs, ils sont aussi parfois bien moins bons. Choisir de suivre les scénarios optimisés, qui s'adaptent, par pas de 10 ans, aux dommages, permet donc de limiter le risque de choisir une mauvaise politique.

On peut tracer quelques graphiques sur les données de ce run pour mieux l'interpréter.

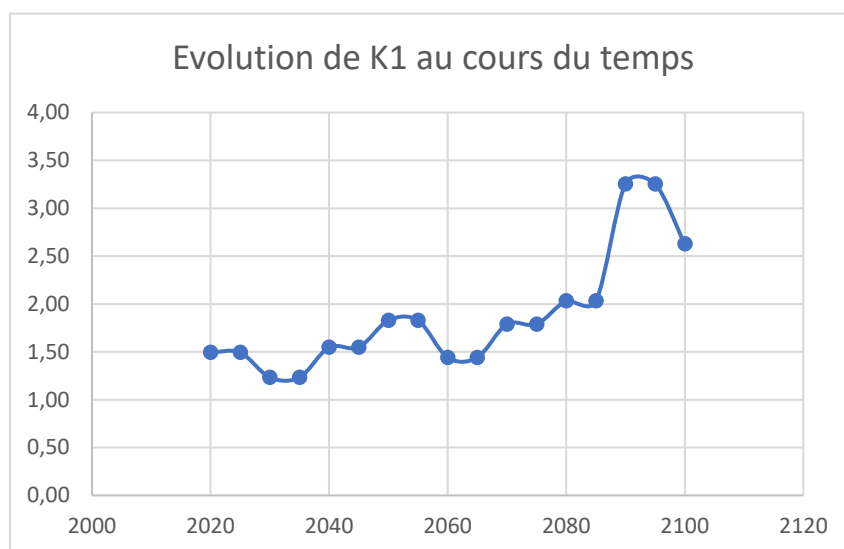


Figure 17/Evolution de K1 au cours du temps pour un run (auteure : C. VALLON).

Tout d'abord en observant l'évolution de K1 au cours du temps, on voit qu'il atteint presque 2 en 2050 avant de redescendre légèrement à 1,5. Enfin il atteint 3.40 en 2090. Toutefois les émissions étant de toute façon considérées constantes post 2060, les K post 2060 ne sont pas pris en compte dans le changement des politiques.

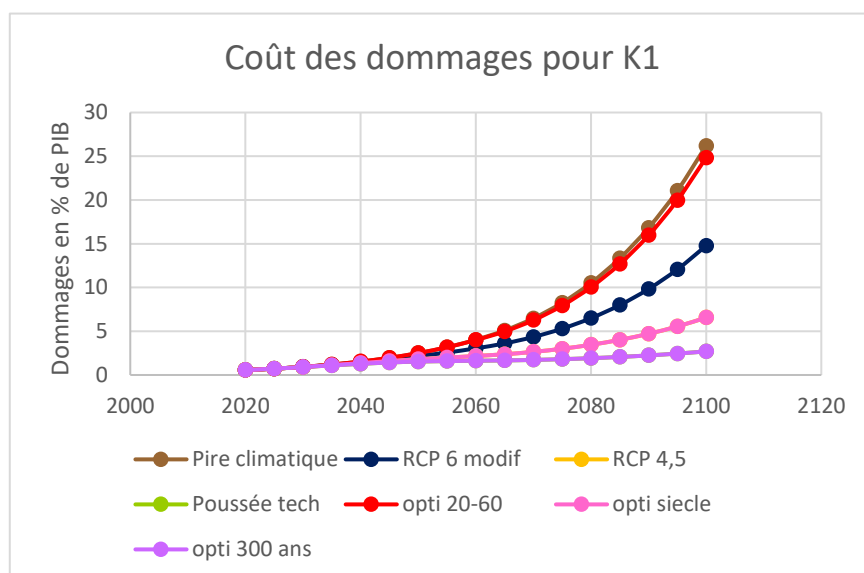


Figure 18/Coût des dommages selon les scénarios pour un run (auteure : C. VALLON).

On s'intéresse désormais au cout des dommages pour ce run. On remarque que la courbe optimisée sur la moyenne de 2020 à 2060 est située entre Pire climatique et RCP6 puisque dans ce scénario optimisé ce sont ces deux politiques qui ont été tour à tour utilisées selon que K dépasse ou non 1.60. Etant donné que K ne dépasse pas la valeur 2.35 avant 2060, les courbes d'optimisation sur le siècle et d'optimisation sur 300 ans sont respectivement

superposées à RCP 4.5 et Poussée technologique.

Pour les coûts d'évitement, c'est assez logiquement la courbe d'optimisation sur 300 ans, superposée à Poussée technologie qui est la plus haute. En effet ils représentent les scénarios dont lesquel des efforts importants sont faits, impliquant des pertes de temps qui génèrent des coûts. En revanche les coûts d'évitement de la politique d'optimisation de courte durée sont très bas, puisqu'elle revient majoritairement à ne rien faire. La courbe d'optimisation sur le siècle est superposée à celles du RCP 4.5. Les coûts d'évitement y sont intermédiaires.

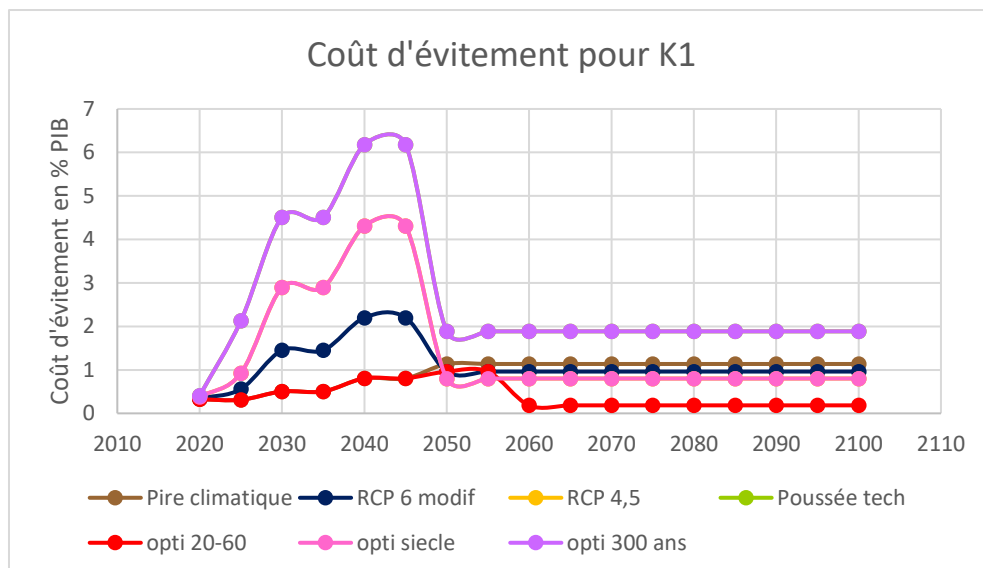


Figure 19/ Coût d'évitement selon les scénarios pour un run (auteure : C. VALLON).

Enfin, on peut observer la courbe de la somme des coûts des dommages et des coûts d'évitement. Dans ce run, c'est le scénario prudent, qui consiste à optimiser les dommages sur 3 siècles qui est l'optimum.

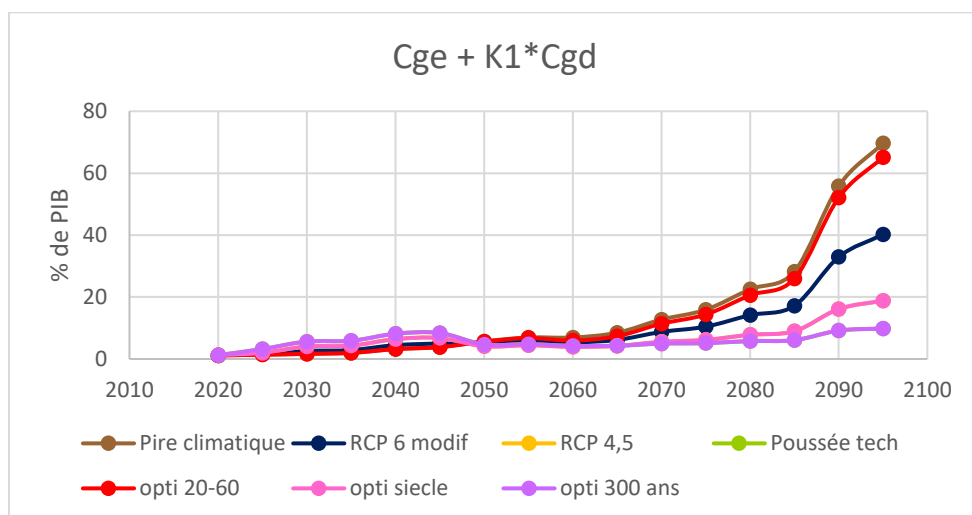


Figure 20/Somme des dommages et évitement pour un run (auteure : C. VALLON).

Comme mentionné précédemment, sur une grande quantité de runs, bien que les scénarios optimisés ne soient pas toujours meilleurs, ils permettent d'assurer un résultat proche de l'optimum. C'est pourquoi en pratique ce type de d'optimisation est souvent intéressant.

Ainsi un facteur d'incertitude K a permis de réaliser des calculs selon que le coût des dommages soient surestimés ou sous-estimés. Dans un travail futur, il serait intéressant de faire de même sur les coûts d'évitement. En effet, ils sont eux aussi incertains puisqu'ils dépendent des mesures qui sont mises en place pour empêcher les dommages. Aussi il faudrait s'interroger sur les capacités d'adaptation au changement climatique, en effectuant d'abord précisément la distinction entre adaptation et évitement, alors que la frontière entre les deux reste parfois floue. L'adaptation étant davantage une sorte de résilience, qui consiste plutôt à supporter les dommages, qu'à les empêcher.

## V. Conclusion et retour réflexif sur le stage

### 1. Organisation du stage

Le stage a eu lieu uniquement en télétravail en raison de la crise sanitaire et de la taille des bureaux du ministère qui ne permettaient pas cette année l'accueil des stagiaires en présentiel. Il a donc fallu s'accoutumer à ce contexte particulier. Comme le montre le calendrier ci-dessous mon travail a été ponctué de rendez-vous avec mon tuteur professionnel. Le plus souvent ces rendez-vous ont eu lieu le matin et ont duré environ trois heures. Ils ont eu lieu quelques fois en visioconférence avec l'outil Lifesize, notamment quand il était nécessaire d'utiliser le partage d'écran pour pouvoir travailler simultanément sur un tableur.

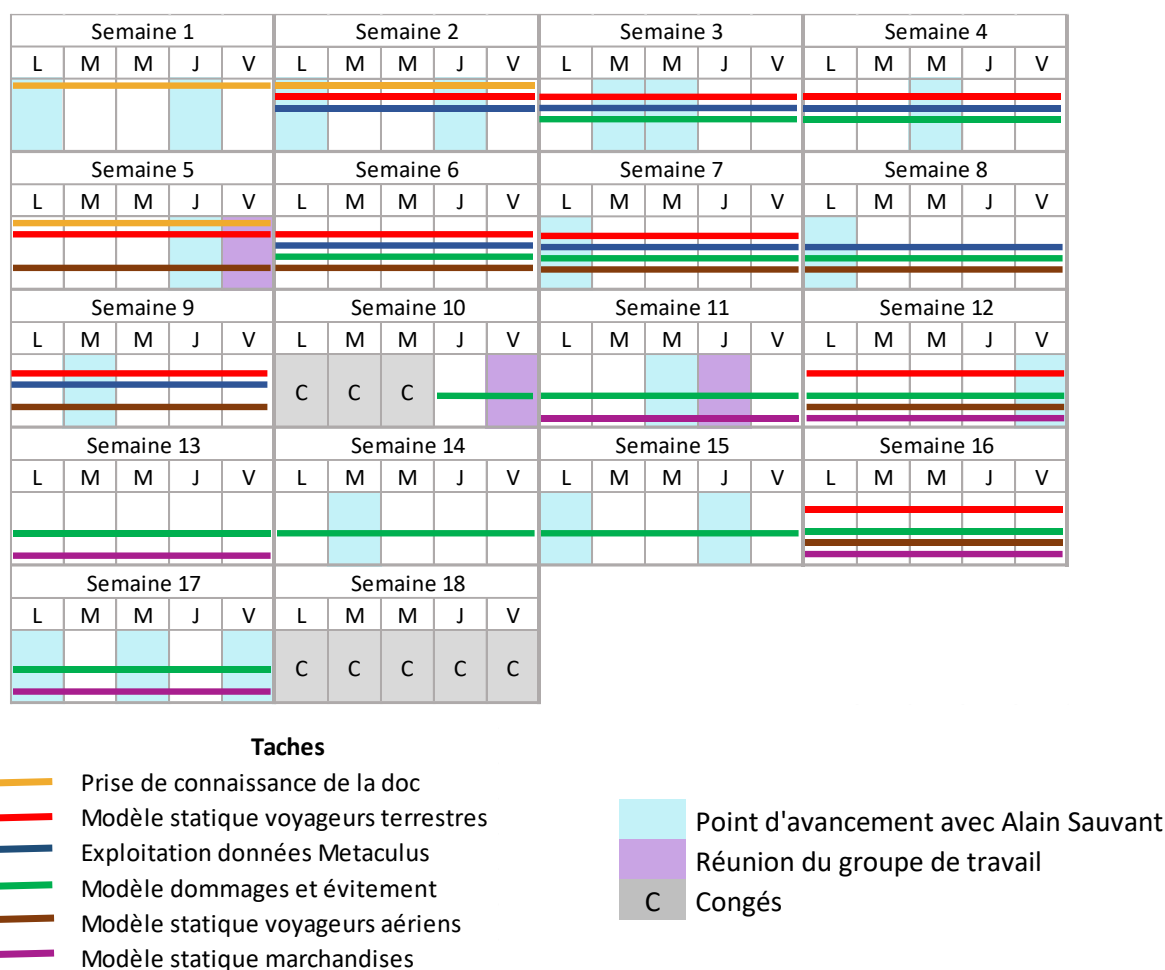


Figure 21/ Calendrier de déroulement du stage (auteure : C. VALLON).

Ces rendez-vous étaient chaque fois l'occasion de revenir sur le travail que j'avais effectué depuis le point d'avancement précédent. Ils me permettaient de poser les questions qui étaient survenues au cours de la semaine et de présenter mon avancement, ce qui soulevait encore d'autres questions. Une fois les différents problèmes des tableurs identifiés et résolus, nous réfléchissions au travail à effectuer jusqu'au prochain rendez-vous. Le tableau montre que ces points ont été plus nombreux au début du stage. En effet, la démarche ayant déjà bien commencé il me fallait prendre connaissance de l'existant pour pouvoir poursuivre et développer le travail. Le début du stage a donc été consacré à la lecture de quelques textes et tableurs Excel. Les points d'avancement permettaient alors de s'assurer que je comprenais bien le sens de la démarche et le début existant.



Les cases en violet représentent quant à elles les réunions de groupes de travail ou les réunions plénières. Comme présenté plus haut, la démarche réunit plusieurs groupes de travail au sein du CGEDD. Certaines réunions sont ainsi prévues pour maintenir une collaboration efficace et veiller à la cohérence des travaux. Elles sont aussi l'occasion de débats intéressants et permettent d'apporter des points de vue différents et des idées nouvelles sur les travaux de chacun. La réunion plénière du premier juillet a rassemblé l'ensemble des acteurs de la démarche (dont le CGEDD) et un public averti, y compris par exemple des employés de l'ADEME. Une quarantaine de personnes étaient présentes pour écouter les différentes présentations dont une bonne partie a été consacrée à l'état d'avancement du groupe voyageurs.

## 2. Les difficultés rencontrées

Le contexte sanitaire expliqué plus haut a induit quelques difficultés puisqu'il m'a fallu travailler seule depuis chez moi. Il faut veiller à bien s'organiser pour limiter l'espace et le temps liés au travail et les séparer du reste du quotidien. Le télétravail implique aussi d'avoir peu de contact avec les employés de la structure, hormis avec Alain Sauvart, par téléphone ou vidéo conférence lors des rendez-vous. Cette organisation a aussi impliqué que les consignes données par mon maître de stage était le plus souvent orales (appels téléphoniques). Il fallait donc que je reste bien concentrée au cours des quelques heures de rendez-vous et que je prenne attentivement en notes ses remarques. Toutefois il m'était aussi possible de poser des questions par mail entre deux points d'avancement et d'avoir donc quelques consignes écrites, qui pouvaient préciser les notes que j'avais prises.

Aussi, la mission en elle-même étant assez mathématique, il y a souvent eu des apparitions d'imprévus dans le travail. En effet, la méthode globale à appliquer était pensée par M. SAUVANT qui me l'expliquait ensuite. Mais derrière une méthode qui en théorie et en globalité fonctionne se cachent souvent des difficultés qui ne se rendent visibles qu'en commençant sérieusement son implémentation. J'ai parfois eu le sentiment que j'étais donc moins efficace que prévu ou que ma progression était lente mais ces problèmes seraient de toute façon survenus. J'ai souvent eu besoin de mon maître de stage qui m'a aidé à les résoudre rapidement avec une grande pédagogie. En raison de ma moindre expérience, je ne disposais pas de toutes les intuitions de mon tuteur professionnel sur les calculs à effectuer et sur les résultats à obtenir. Pour permettre à M. Sauvart d'identifier plus facilement mes erreurs et de comprendre mon raisonnement il était important que je documente correctement le tableur. Cela a aussi été une difficulté pour moi, lorsqu'on crée un tableur il est nécessaire qu'il soit compréhensible sans les commentaires de l'auteur pour être exploitable. Il faut donc y inscrire précisément le nom des variables, les unités, les échelles afin qu'il se suffise à lui-même.

## 3. Vers un univers professionnel

Au-delà de ces quelques difficultés, il y a des aspects de la mission que j'ai particulièrement apprécié. Premièrement j'ai apprécié le fait d'apprendre le travail d'assistant ingénieur, assez calculatoire, sur des modèles intéressants à comprendre et à interpréter et qui doivent fournir des résultats présentables. Même si les interactions avec les autres employés ont été limitées, j'ai assisté avec plaisir aux débats riches qui ont eu lieu durant les réunions de groupe de travail.

Plus globalement, ce stage m'a permis d'acquérir des connaissances et une culture générale sur des sujets qui m'intéressaient déjà comme les transports, la pollution, le réchauffement climatique, les mesures à mettre en place pour lutter... Je projette donc mon activité professionnelle vers ce type de poste, c'est-à-dire un poste faisant appel à des compétences scientifiques et traitant des sujets tels que les transports ou le dérèglement climatique. Les sujets liés au réchauffement climatique me tiennent à cœur et je m'épanouis donc dans un travail qui va dans ce sens. Toutefois, en discutant de mon expérience avec mes camarades de formation, j'ai pu m'apercevoir que nombres d'entre eux

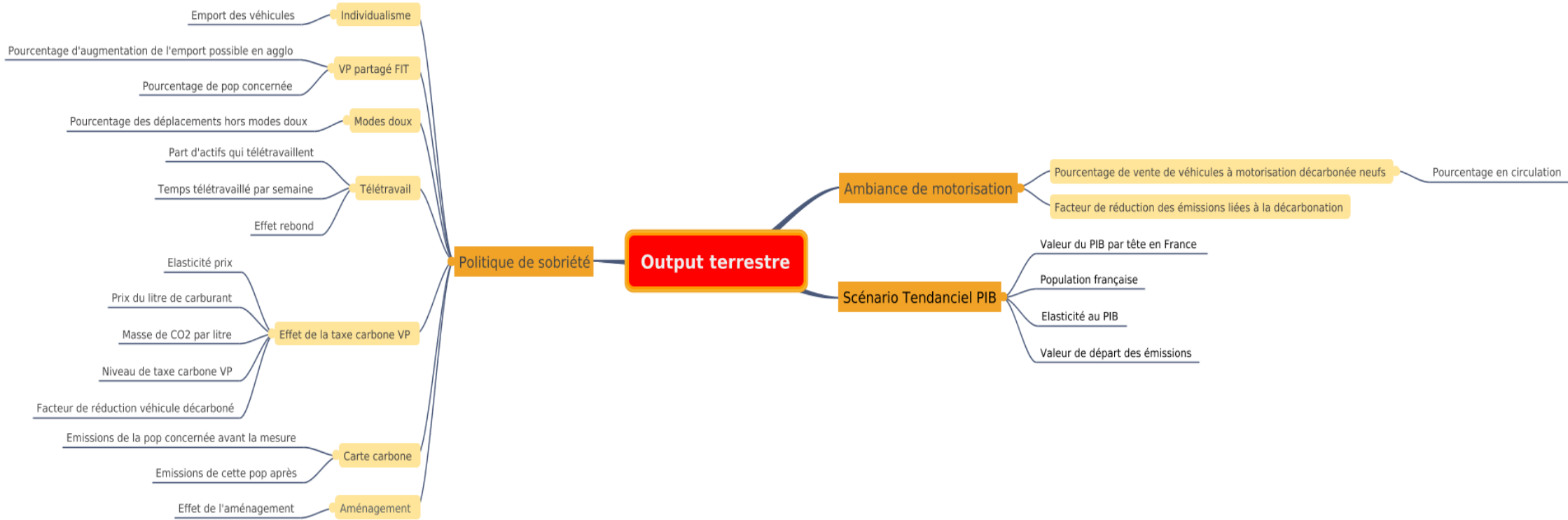
avaient aussi eu une expérience de terrain. Il est vrai que pour l'avenir j'aimerais occuper un poste avec quelques missions sur le terrain, mais cette mission ne s'y prêtait pas, l'échelle étant très grande.

## VI. Bibliographie

- ADEME. 2016. « Etude sur les différentes formes de services de Véhicules de Transport avec Chauffeur (VTC) ».
- ADEME. 2016. Les potentiels du véhicule électrique. <https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/2467-potentiels-du-vehicule-electrique.html>
- Commissariat général au développement durable. 2020. *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2020*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2020-0>.
- Commissariat général du développement durable. 2019. *Les comptes des transports en 2018 - 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la>
- FIT. 2018. *Shared Mobility Simulations for Dublin*. <https://www.itf-oecd.org/shared-mobility-dublin>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Rajendra Kumar Pachauri, et Leo A. Meyer. 2015. *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2021. *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- Hoffmann, Marco, Vilho Räsänen, et Kimmo Hätönen. 2020. « 6G Architecture to Connect the Worlds ». *IEEE Access* 8:173508-20. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025032.
- Nordhaus, W. 2016. *Revisiting the social cost of carbon*. <https://www.pnas.org/content/114/7/1518.short>
- Obergassel, Wolfgang, Oliver Lah, et Frederic Rudolph. 2021. « Driving towards Transformation? To What Extent Does Global Climate Governance Promote Decarbonisation of Land Transport? » *Earth System Governance* 8:100098. doi: 10.1016/j.esg.2021.100098.
- Pärssinen, A., Alouini, M., Berg, M., et al. (2020). White Paper on RF Enabling 6G –Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum [White paper]. (6G Research Visions, No. 13). University of Oulu. <http://urn.fi/urn:isbn:97895262284196G>
- Sauvant, A. « Transport et environnement », cours.

## Annexes

### Annexe 1- Arborescence des variables du modèle voyageurs terrestres.



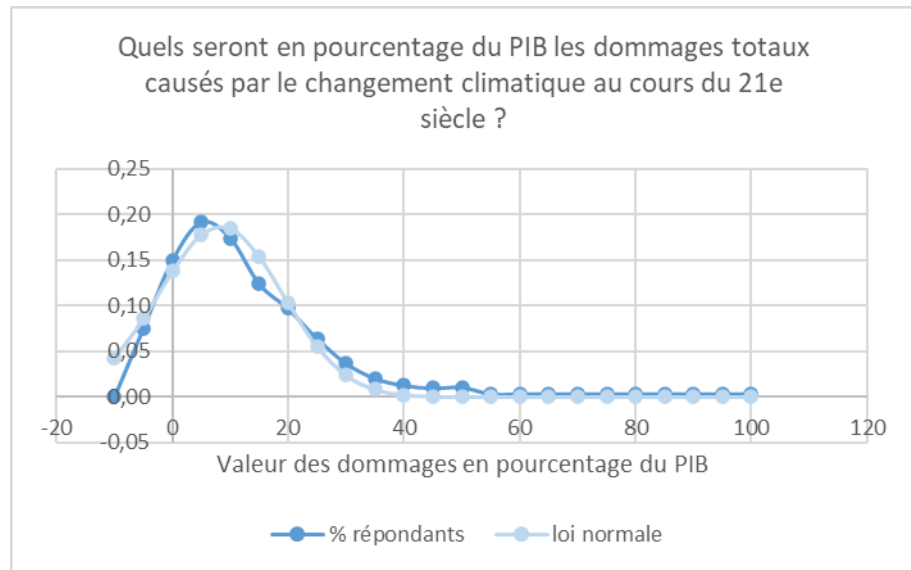
Annexe 2 – Comparaison entre la loi normale et la distribution des réponses.

Comparaison à la loi normale :

Médiane = 8.34

Ecart type = 10.68

Erreur par la méthode des moindres carrés = 4.10/1000



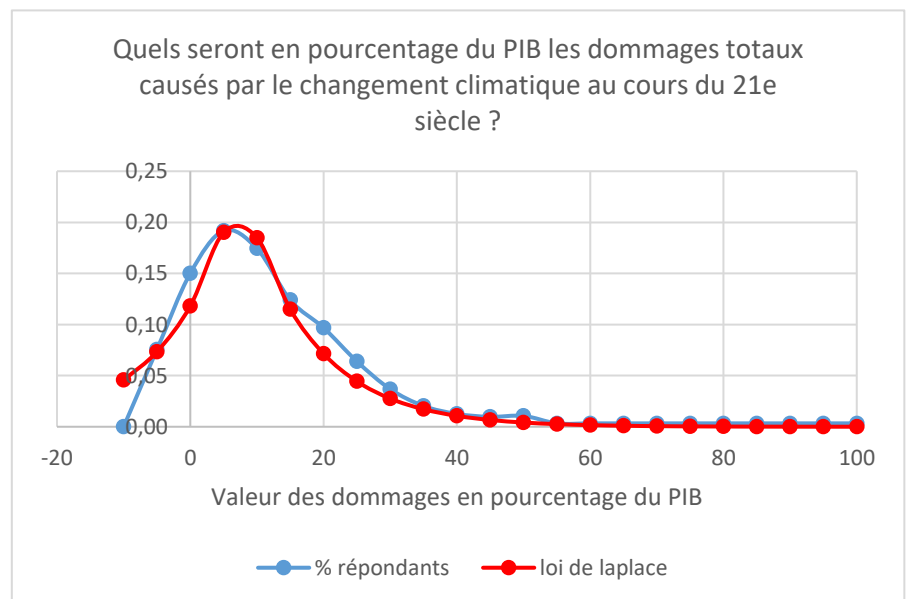
Annexe 3- Comparaison entre la loi de Laplace et la distribution des réponses.

Comparaison à la loi de laplace :

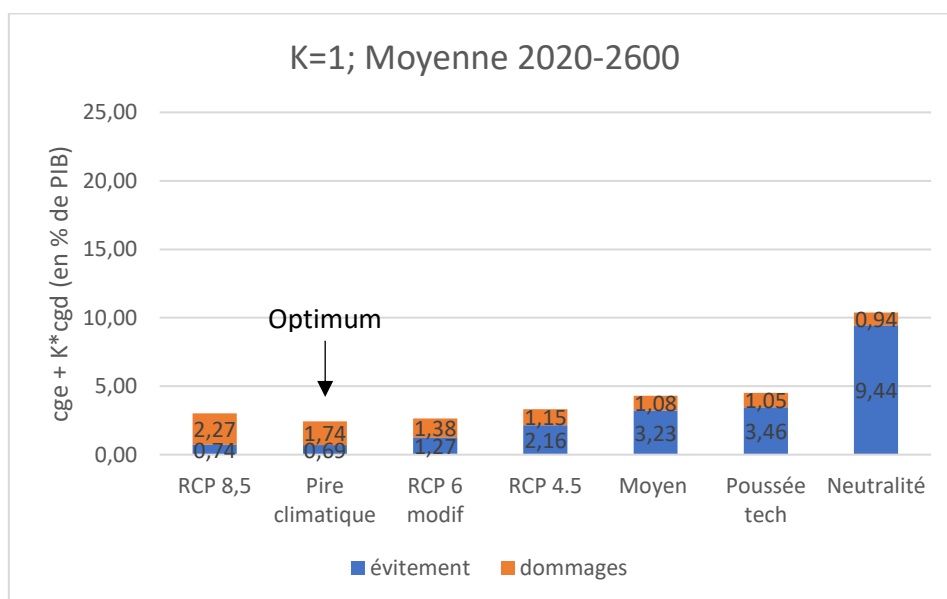
Médiane = 7.4

Ecart type = 14.88

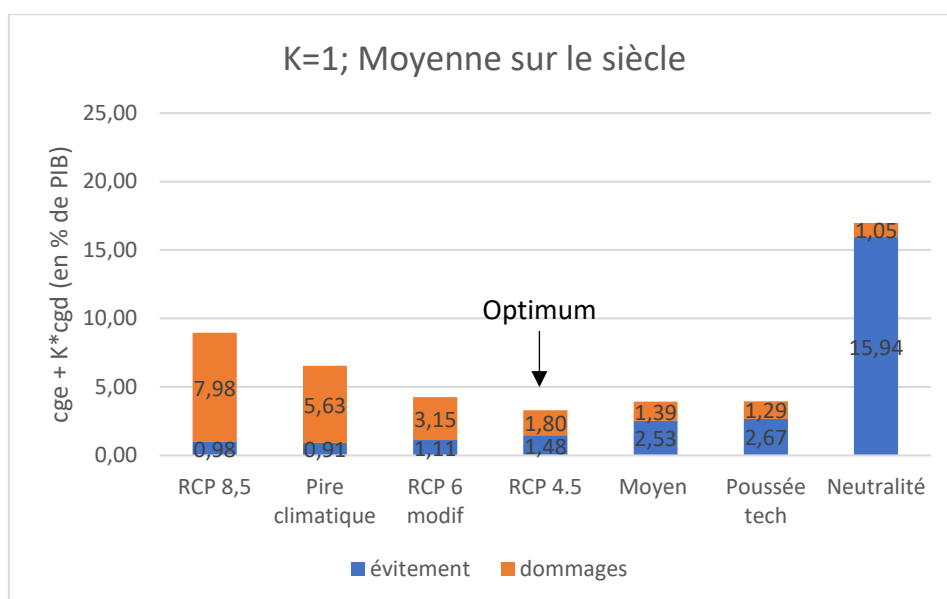
Erreur par la méthode des moindres carrés = 4.57/1000



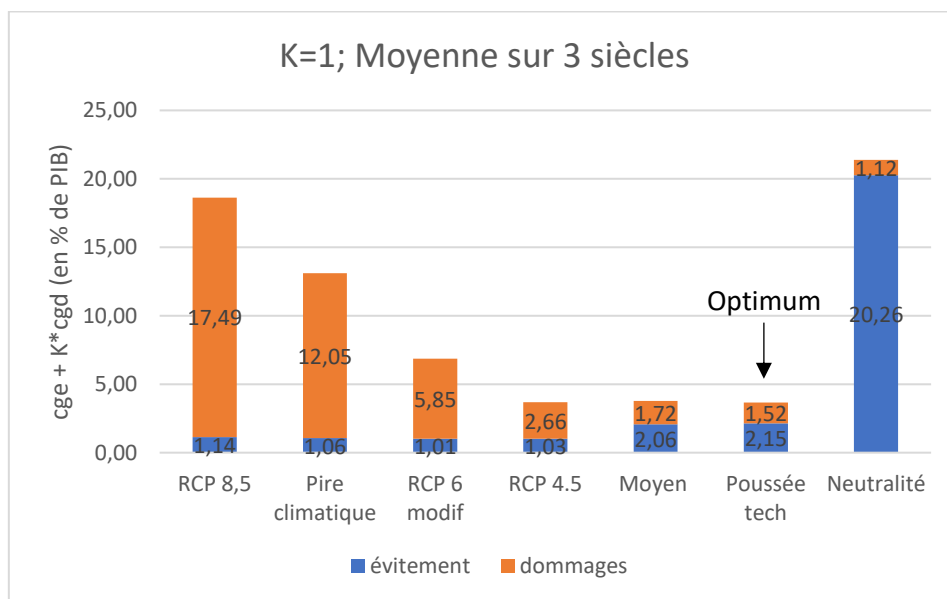
Annexe 4 – Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne 2020-2060 ;  
K=1.



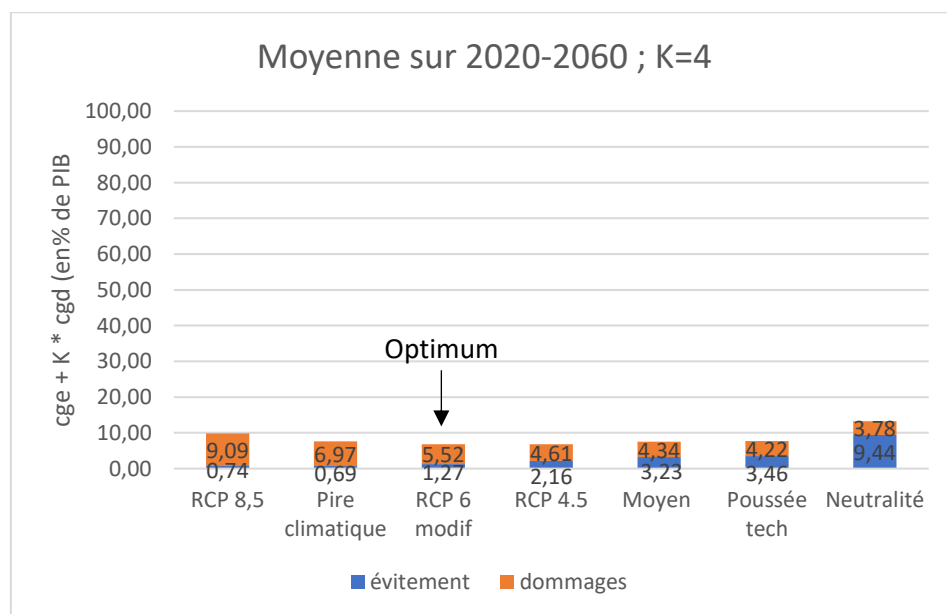
Annexe 5- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur le siècle ;  
K=1.



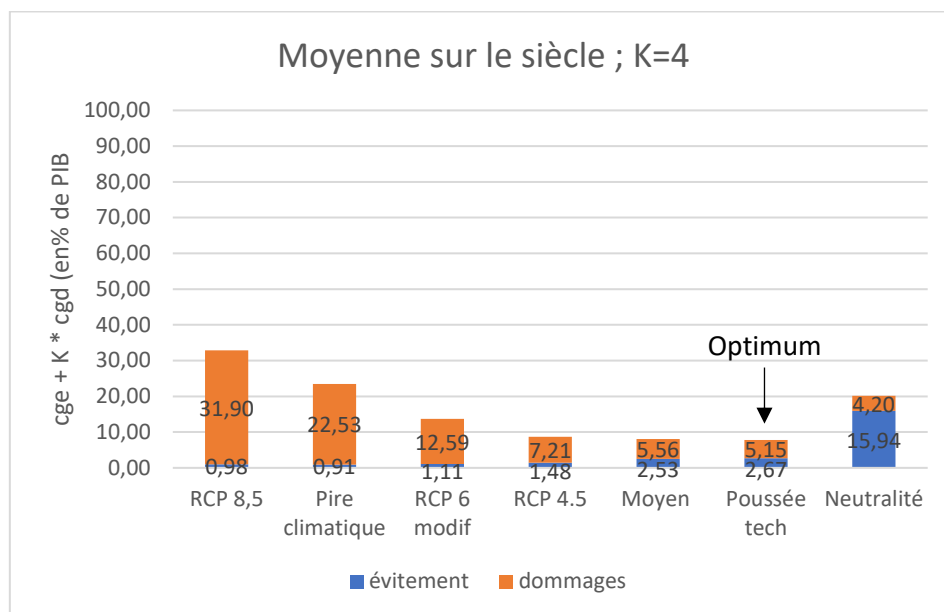
Annexe 6- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur trois siècles ; K=1.



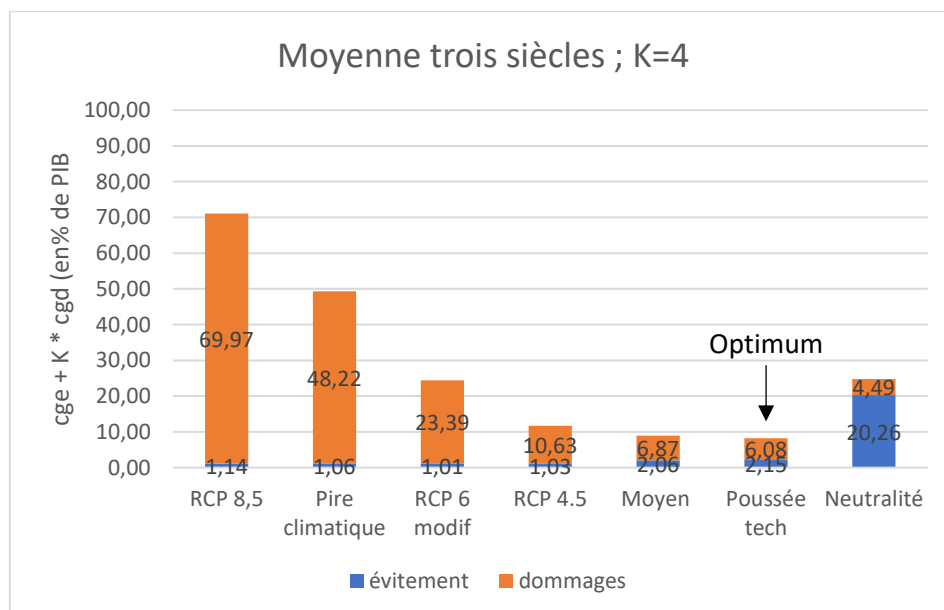
Annexe 7- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne 2020-2060 ; K=4.



Annexe 8- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur le siècle ; K=4.



Annexe 9- Graphique de la somme des coûts des dommages et évitement en moyenne sur trois siècles ; K=4.





POLYTECH<sup>®</sup>  
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS  
37200 TOURS

## Aide à la décision publique sur la qualité des mobilités compte tenu des incertitudes environnementales

### Résumé

Ce rapport de stage a été écrit à la suite de mon stage de fin de quatrième année à Polytech Tours, au cours de mes études en génie de l'aménagement et de l'environnement. Il permet de présenter les missions sur lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler au sein du CGEDD. Il constitue aussi une opportunité de faire un retour réflexif sur cette expérience professionnelle.

Mes missions ont consisté à analyser un faisceau de scénarios de politique de sobriété et de motorisation pour vérifier leurs impacts respectifs sur l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre. De plus, un optimum entre les coûts des dommages liés au changement climatique et les coûts d'évitement, selon un facteur d'incertitude sur l'importance des dommages, a été recherché. Les résultats sont présentés et illustrés, souvent en prenant la forme de graphiques, dans ce rapport.

### Abstract

This internship report was written following my fourth-year internship at Polytech Tours, during my studies in planning and environmental engineering. It presents the missions I had the opportunity to work on within the CGEDD. It is also a mean to take a step back about this professional experience.

My missions consisted in analysing a set of sobriety and motorisation policy scenarios to verify their respective impacts on the future evolution of greenhouse gas emissions. In addition, an optimum between climate change damage costs and avoidance costs, depending on a damage uncertainty factor, was sought. The results are presented and illustrated, often in graphical form, in this report.

Tuteur entreprise : Alain  
Sauvant, directeur de  
l'AQST

Tuteur académique :  
Kamal Serrhini

CGEDD

Chloé Vallon

2020-2021