



Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Accord de Paris :
Combinaisons d'actions à l'échelle internationale en vue de résorber
le « mitigation gap »**

Mémoire de Fin d'Études présenté par
LECOQ Anaïs
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement
ENVI4

Année académique : 2018-2019

Directeur :
Etienne HANNON

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Etienne Hannon pour son encadrement et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je désire également remercier mes proches et amis pour leur soutien lors de l'élaboration de ce mémoire.

Résumé

L'Accord de Paris prévoit de limiter l'augmentation de température globale bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels tout en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de température globale à 1,5°C et d'atteindre des « émissions nettes zéro » entre 2050 et 2100. Ce mémoire a pour but déterminer les implications de ces objectifs en termes de trajectoires d'émissions et les actions à mettre en œuvre pour y arriver. Cela inclut la catégorisation des mesures à mettre en œuvre dans les différents secteurs d'activité économique, les obstacles à leur mise en œuvre, les potentiels de réduction d'émissions dans ces secteurs et la mise en perspective de l'interaction entre les aspects politique, économique et technique.

Il est question dans ce mémoire de faire un état de la littérature, incluant certains rapports récents issus d'institutions faisant autorité dans ce domaine. L'analyse de ces rapports est complétée par diverses sources de la littérature scientifique.

Il est aujourd'hui possible de résorber le « mitigation gap » d'un point de vue technico-économique. Cependant, ce n'est qu'en déployant le potentiel technico-économique de l'ensemble des secteurs qu'il sera possible d'atteindre les objectifs de température de l'Accord de Paris.

Le frein principal pour atteindre ces objectifs est le manque d'ambition en matière climatique et un cadre politique et de gouvernance inadéquat. Si l'on veut atteindre des transformations systémiques et sociétales adéquates, il faudra créer des cadres de gouvernance à tous les niveaux et mettre à disposition les moyens financiers adéquats pour atteindre le plus grand potentiel de réduction possible.

Enfin, les solutions d'élimination du carbone atmosphérique doivent être davantage développées d'un point de vue technologique et économique pour pouvoir compenser les émissions restantes à la deuxième moitié du siècle.

Table des matières

Résumé	II
Table des figures.....	V
Table des annexes.....	VI
Acronymes	VI
1. Introduction.....	1
2. Accord de Paris : objectifs d'atténuation et implications en termes de trajectoire d'émission/budget carbone.....	4
2.1. Évolution des objectifs et engagements en matière de réduction d'émissions	5
2.2. Accord de Paris : objectifs de température et de réduction d'émission.....	9
3. Tendances des émissions anthropiques.....	13
3.1. Émissions historiques	13
3.2. Projections.....	17
3.2.1. A l'horizon 2030.....	17
3.2.2. A long terme	21
3.3. Écart entre les objectifs et les trajectoires actuelles (« mitigation gap »).....	22
4. Réduction du mitigation gap	26
4.1. Réduction du mitigation gap : une combinaison d'actions	26
4.2. Changements systémiques.....	27
4.2.1. Système énergétique	28
4.2.2. Transport.....	34
4.2.3. Industrie	39
4.2.4. Usages du sol.....	41

4.2.5. Villes et infrastructures.....	45
4.3. Changements dans la gouvernance.....	49
4.3.1. Renforcement des politiques nationales.....	50
4.3.2. Gouvernance à plusieurs niveaux	51
4.3.3. Innovation technologique.....	55
4.3.4. Finance	57
4.3.5. Changements de comportements.....	62
4.4. Absorption du carbone.....	66
4.4.1. Puits de carbone naturels	68
4.4.2. Puits de carbone technologiques	70
4.4.3. Combinaison de puits de carbone naturels et technologiques : BECCS	73
4.5. Récapitulatif des combinaisons d'actions	74
5. Conclusions.....	79
6. Bibliographie	82
7. Annexes	109

Table des figures

Fig. 1. Historique des émissions mondiales de CO₂, de la consommation d'énergie, du produit intérieur brut (PIB), de la population, de la valeur ajoutée industrielle et du niveau d'urbanisation entre 1980 et 2015.....	13
Fig. 2. Émissions historiques et émissions cumulées des principaux émetteurs. Les émissions cumulées des États-membres de l'UE sont présentées dans un graphique séparé.....	14
Fig. 3. Émissions mondiales de gaz à effet de serre par type de gaz (à gauche) et principaux émetteurs de gaz à effet de serre, à l'exclusion des émissions dues aux changements d'affectation des sols, faute de données fiables (à droite).	16
Fig. 4. Les émissions de gaz à effet de serre en pourcentage de variation des niveaux d'émissions de 1990.	16
Fig. 5. Variations des émissions par niveau de revenu et différents scénarios de 2005-2015 à 2030.	18
Fig. 6. Illustration des trois repères de l'article 4.1 de l'Accord de Paris pour la mise en œuvre de l'article 2.1 (boîtes bleu foncé) et des repères mondiaux de décarbonisation (boîte blanche).	21
Fig. 7. Émissions historiques et objectifs des NDC.	23
Fig. 8. Les émissions mondiales de gaz à effet de serre selon différents scénarios et l'écart des émissions en 2030 (estimation médiane et fourchette du 10ème au 90ème percentile).	25
Fig. 9. Potentiels fondamentaux de réduction totale des émissions par rapport au scénario politique actuel en 2030.	28
Fig. 10. Évolution de l'approvisionnement énergétique dans le scénario énergétique, montrant les principaux développements	30
Fig. 11. Rôle de l'élimination du dioxyde de carbone dans l'atténuation du changement climatique.	67

Table des annexes

Annexe 1. Part des 12 plus grands émetteurs dans la totalité des émissions

Annexe 2. Pays classés par groupe selon leur revenu.

Annexe 3. Vue d'ensemble du statut des membres du G20, y compris les engagements pris à Cancun et les objectifs des CDN.

Annexe 4. Émissions de gaz à effet de serre globales en 2030 sous différents scénarios (médiann et amplitude du 10^{ème} au 90^{ème} percentile), implications de températures et l'écart d'émissions qui en résulte.

Annexe 5. Vue d'ensemble des potentiels de réduction d'émission par secteur.

Acronymes

AFOLU : Agriculture, Forestry and Land-Use

BECCS: Bioenergy combined with Carbon Capture and Storage

CBDR-RC : Responsabilités communes mais différenciées et capacités respectives

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CCS : Carbon Capture and Storage

CDN : Contributions Déterminées au niveau National

CDR : Carbon Dioxide Removal

COP : Convention des Parties

CPLC : Carbon Pricing Leadership Coalition

EJ: Exajoule

FAO : Food and Agriculture Organization (of the United Nations)

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

Gt : Gigatonne

GtCO₂ : Gigatonne de CO₂

GtCO_{2e} : Gigatonne d'équivalent CO₂

GW: Gigawatt

IEA : International Energy Agency

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques

PMA : Pays les moins avancés

ppm : Parts per million

RE5 : 5^{ème} Rapport d'Evaluation

UE : Union européenne

UNEP : United Nations Environment Programme

1. Introduction

Description de la problématique

Depuis une trentaine d'année, les préoccupations concernant les changements climatiques n'ont fait qu'augmenter (Wei et al., 2019 ; Nieto et al., 2018). Le changement climatique est aujourd'hui au centre du débat public et des préoccupations au niveau mondial (Maamoun, 2019).

L'Accord de Paris marque un tournant décisif pour la lutte contre les changements climatiques. En effet, plus de 195 pays se sont engagés à limiter l'augmentation de température globale bien en deçà de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100 (Gieseckam et al., 2018) en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de température globale à 1,5°C (Dong et al., 2018 ; Morgan et al., 2019).

En octobre dernier, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, ou IPCC en anglais) a publié un rapport spécial alarmant basé sur l'évaluation de la littérature scientifique, technique et socio-économique disponible qui met en garde contre les conséquences dramatiques que pourrait engendrer une augmentation de températures supérieures à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels (IPCC, 2018). Ce rapport sert de base scientifique pour le Dialogue de Talanoa, qui a pris fin lors de la COP24 en décembre 2018 à Katowice en Pologne. Le Dialogue de Talanoa a pour but de faire le point sur l'avancée des efforts fournis par les parties à l'échelle mondiale pour arriver aux objectifs de long terme de l'Accord de Paris et de renforcer l'ambition des engagements des parties d'ici 2020.

Il est clair que la lutte contre les changements climatiques doit aujourd'hui être une priorité mondiale, et que l'ambition mondiale en matière climatique doit être largement rehaussée si l'on veut limiter l'augmentation de température à 1,5°C ou 2°C.

Objectifs de recherche et méthodologie

Pour arriver aux objectifs de l'Accord de Paris, il sera nécessaire de mettre en œuvre de nombreuses actions dans différents secteurs d'activité économique. Ce mémoire a pour but répondre à plusieurs questions de recherche :

- Quelles sont les implications de l'objectif de température de l'Accord de Paris en termes de trajectoire d'émission/budget carbone ?
- Quelles sont les actions à mettre en place pour y parvenir ?
- Quels sont les obstacles à la mise en œuvre de ces actions ?

La réponse à ces questions permettra de discuter de la faisabilité de la neutralité carbone à l'horizon 2050 (autrement dit de résorber le « mitigation gap ») et de présenter les combinaisons d'actions requises pour y parvenir.

Il est question dans ce mémoire de faire un état de la littérature, de synthétiser les différentes ressources et d'analyser les propositions émanant de diverses institutions et de la littérature scientifique.

La littérature inclut des rapports récents issus d'institutions faisant autorité dans ce domaine, notamment :

- les différents rapports du GIEC (publiés en 1990, 1995, 2007, 2014 et 2018),
- différents documents publiés par la CCNUCC (publiés en 1992, 2015 et 2017)
- différents rapports de l'UNEP : « Emissions gap report » (publiés en 2017 et 2018),
- différents « World Energy Outlook » de l'IEA (publiés en 2016 et 2017)
- différents rapports du « New Climate economy » (publiés en 2014 et 2018)

L'analyse de ces rapports est complétée par diverses sources de la littérature scientifique.

Pour répondre aux questions de recherche, ce mémoire comprendra plusieurs aspects. Il inclura les potentiels de réduction d'émissions dans les différents secteurs, la catégorisation des mesures à mettre en œuvre dans ces secteurs, les obstacles à leur mise en œuvre et la mise en perspective de l'interaction entre les axes politique, économique et technique.

Ce mémoire sera divisé en plusieurs parties. Tout d'abord, le chapitre 2 qui est destiné à mettre en contexte l'Accord de Paris, ses objectifs et les implications de ceux-ci en termes de trajectoire d'émissions et de budget carbone. Ce chapitre sera divisé en deux parties : le point 2.1., qui fournit un contexte historique dans lequel sera décrite l'évolution des objectifs et engagements en matière de réduction d'émissions avant l'Accord de Paris, et le point 2.2 où les objectifs d'atténuation de l'Accord de Paris et les implications en termes de trajectoire d'émission et de budget carbone de ces objectifs seront décrits.

Le chapitre 3 permet d'avoir un aperçu des tendances d'émissions historiques, mais aussi des projections d'émissions à court et long terme. Ce chapitre est divisé en trois parties. La partie 3.1. présente les émissions historiques, mettant en lumière la responsabilité historique des différents pays et leur part d'émissions dans la totalité des émissions mondiales. La partie 3.2. présentera les projections d'émissions à court terme, c'est-à-dire à l'horizon 2030 et à long terme, c'est-à-dire au-delà de 2030. Enfin, le point 3.3., présentera un aperçu de l'écart entre les objectifs et les trajectoires actuelles, le « mitigation gap ».

Le chapitre 4 consiste en un aperçu des changements à effectuer et des actions à mettre en place dans différents secteurs pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Il sera divisé en plusieurs parties : une première section, la section 4.1., permet de comprendre la multidisciplinarité de la lutte contre les changements climatiques et la nécessité de la mise en œuvre d'actions simultanées dans différents secteurs pour pouvoir atteindre les objectifs de température. La section 4.2. consistera en une synthèse des changements systémiques à mettre en place. Elle sera divisée en cinq parties, correspondant à cinq secteurs : le système énergétique, le transport, l'industrie, l'usage du sol, et enfin les villes et infrastructures. La section 4.3.

consistera en une synthèse des changements à effectuer en matière de gouvernance. Elle sera divisée en cinq parties : le renforcement des politiques nationales, la gouvernance à plusieurs niveaux, l'innovation technologique, la finance et les changements de comportements. Enfin, la section 4.4. synthétisera les solutions d'élimination du carbone atmosphérique et sera divisée en trois parties : les puits de carbone naturels, les puits de carbone nécessitant une intervention technologique, et la combinaison de puits de carbone naturels et technologiques. Le chapitre 4 se conclura par la section 4.5., qui consistera en un bref récapitulatif des combinaisons d'actions à mettre en œuvre afin d'avoir une meilleure vision globale de ces actions.

Ce mémoire se terminera par le chapitre 5, les conclusions.

2. Accord de Paris : objectifs d'atténuation et implications en termes de trajectoire d'émission/budget carbone

Depuis plus de 60 ans, la mondialisation stimule l'économie mondiale, avec un PIB mondial qui s'est multiplié de plus de 55 fois (Shuai et al., 2019). L'augmentation de l'activité économique s'est couplée à une augmentation de consommation d'énergie et, depuis les années 70, nous assistons à une augmentation de l'utilisation des énergies fossiles à l'échelle mondiale, boostée par leur utilisation dans les pays en voie de développement, et particulièrement en Chine depuis les années 90 (Deutch, 2017 ; Nyambuu et Semmler, 2019).

Avec l'augmentation de l'utilisation des énergies fossiles, les émissions mondiales de gaz à effet de serre n'ont cessé d'augmenter dans les dernières décennies (Deutch 2017 ; UNEP, 2018), avec une augmentation moyenne des émissions de carbone de 2,6% par an entre 1960 et 2014 (Shuai et al., 2019), résultant en une augmentation de température d'environ 1°C par rapport aux niveaux préindustriels (Nyambuu et Semmler, 2019) (fourchette probable entre 0,8°C et 1,2°C (IPCC, 2018)).

Aujourd'hui, plus de 80% de la consommation mondiale d'énergie provient d'énergies fossiles (Mardani et al., 2019) et les émissions de CO2 associées à la consommation d'énergie fossile et des processus industriels représentent la majorité des émissions mondiales (UNEP, 2018). Les énergies fossiles telles que le charbon et le pétrole représentent à elles seules respectivement plus de 45% et 35% des émissions mondiales du secteur énergétique, contre 20% environ pour le gaz naturel (Nyambuu et Semmler, 2019). Il est donc primordial de s'attaquer à la réduction massive de celles-ci si l'on veut atteindre l'objectif.

Il convient face au changement climatique par une action collective mondiale (Livermore et Revesz, 2017 ; Nyambuu et Semmler, 2019). C'est pourquoi depuis la fin des années 70 un grand nombre d'accords internationaux ont été signés et des politiques ont été mises en place afin de diminuer la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Maamoun, 2019).

2.1. Évolution des objectifs et engagements en matière de réduction d'émissions

Les objectifs et engagements en matière de réduction d'émissions ont beaucoup évolué depuis une trentaine d'années avant d'arriver aux objectifs de l'Accord de Paris : en 1992, lors de la création de la CCNUCC, on parle d'un objectif non quantitatif. En 1997, lors du Protocole de Kyoto, un objectif quantifié est attribué aux pays industrialisés. En 2007, lors de l'Accord de Copenhague, le premier objectif de température est introduit. Enfin, en 2015, l'Accord de Paris est signé.

a. Création de la CCNUCC : un objectif non quantitatif

Dans son premier rapport d'évaluation en 1990, le GIEC établit qu'il faudra diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 60% si l'on veut stabiliser les concentrations de carbone aux niveaux de l'époque (IPCC, 1990).

En 1992, un traité de coopération internationale a été signé par 178 pays lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement à Rio de Janeiro : la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) (Wei et al., 2019). L'objectif principal de la Convention-Cadre, énoncé dans l'Article 2 de la Convention, est de lutter contre les changements climatiques en « stabilisant les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau permettant d'éviter toute interférence anthropique dangereuse avec le système climatique » (Ari et Sari, 2017 ; Morgan et al., 2019 ; Wei et al., 2019 ; UNFCCC, 1992). Cependant, l'Article 2 ne fournit pas d'objectif quantitatif, ni en termes d'émissions, ni en termes de température (UNFCCC, 1992).

Les pays membres de la CCNUCC sont tenus de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre compte tenu de leur responsabilité actuelle et historique et de leur capacité de réduction d'émission (Ari et Sari, 2017). Celles-ci sont mises en valeur dans le principe des « responsabilité communes mais différenciées et des capacités respectives » (CBDR-RC) de la CCNUCC (UNFCCC, 1992).

Les pays sont classés en trois groupes : l'Annexe I, l'Annexe II et les pays non-Annexe I. Les pays considérés comme développés (en 1992) sont classés dans l'Annexe I et sont tenus de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Les pays de l'Annexe II sont un sous-ensemble de l'Annexe I, reprenant les pays les plus riches d'entre eux (à savoir les pays de l'OCDE) et doivent à la fois réduire leurs émissions et fournir des ressources financières et du transfert technologique aux pays en développement, ce qui les distingue des autres pays de l'Annexe I. Les pays non-Annexe I sont les pays considérés comme en voie de développement (en 1992) et sont uniquement tenus de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (Ari et Sari, 2017 ; Jernnas et Linner, 2019 ; Nieto et al., 2018). Les pays qui ne sont repris dans aucune annexe n'ont pas d'objectifs contraignants de réduction d'émission (Ari et Sari, 2017 ; Jernnas et Linner, 2019).

A la suite de cet accord, le GIEC a fourni son appui à de nombreuses études menées par les communautés scientifique et économique afin de donner une interprétation quantifiée à

l'Article 2 de la Convention en termes de concentration de gaz à effet de serre et les implications que cela aurait sur les émissions futures, les changements de température et le niveau de la mer (Wigley et al., 1996).

b. Protocole de Kyoto : un objectif quantifié pour les pays industrialisés

En 1997, le Protocole de Kyoto est ratifié, aujourd'hui signé par 192 pays et juridiquement contraignant pour les pays industrialisés (Aldy et Stavins, 2013 ; Maamoun, 2019). Le concept de « corridor sûr », déjà apparu avant la ratification du Protocole, est évoqué afin d'illustrer de manière quantitative les objectifs présentés dans l'Article 2 de la CCNUCC. Il représente les trajectoires d'émissions qui permettraient de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à long terme et ainsi de limiter le réchauffement climatique (Oppenheimer, 2005).

Selon le deuxième rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 1995), les émissions de gaz à effet de serre devraient être diminués d'ici 2100 d'au moins 50% par rapport aux niveaux de l'époque, qui étaient de 7GtCO₂/an, allant jusqu'à une réduction de 70% pour le CO₂. Pour arriver à cet objectif, le Protocole stipule que les pays industrialisés doivent s'engager à réduire leurs émissions de 5,2% en moyenne par rapport à leurs niveaux de 1990 dans la première période du Protocole, c'est-à-dire entre 2008 et 2012 (Aldy et Stavins, 2013 ; Maamoun, 2019).

Le Protocole de Kyoto a été vivement critiqué notamment à cause de la différenciation entre les pays en termes juridiques, ce qui a diminué l'efficacité de celui-ci (Maamoun, 2019). De plus, les pays en transition vers une économie de marché (ex-URSS et pays satellites) se sont vus allouer des montants d'émissions bien supérieurs à ce qu'ils utilisaient, ce qui ne les incitait pas à réduire leurs émissions (Maamoun, 2019). En effet, seuls 27 pays dépassent leurs objectifs de réduction d'émission à la fin de la première période, et leurs efforts ne suffisent pas pour atteindre les objectifs de la CCNUCC (Ari et Sari, 2017).

c. Accord de Copenhague : première référence à un objectif de température

En 2007, dans son 4^{ème} rapport d'évaluation, le GIEC met en place plusieurs scénarios d'augmentation de température et de l'impact que ceux-ci pourraient avoir sur la planète, en insistant sur le fait que les mesures mises en place ne sont alors pas suffisantes pour arrêter le réchauffement climatique (IPCC, 2007). Le GIEC prévient également que les prochaines décennies seront cruciales pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre : pour une stabilisation entre 445ppm et 490ppm (ce qui équivaut à une augmentation de température entre 2°C et 2.4°C), il faudrait atteindre les pics d'émissions avant 2015 et réduire les émissions de 50% à 85% d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2000 (IPCC, 2007).

Lors de la COP15 en 2009, l'Accord de Copenhague est négocié entre quelques acteurs principaux parmi lesquels les États-Unis et des pays en développement tels que la Chine, l'Inde, le Brésil et l'Afrique du Sud (Lau et al., 2012). L'Accord de Copenhague stipule qu'il faut stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et « limiter l'augmentation de la température à 2°C pour éviter toute interférence anthropique dangereuse avec le système climatique » (Lau et al., 2012).

Aucune limite d'émissions ni au niveau national, ni au niveau global n'est évoquée. Ce sera aux parties de définir leurs propres objectifs de réduction, et ceux-ci seront vérifiés en fonction du groupe Annexe auquel le pays appartient (Annexe I pour les pays industrialisés et Annexe II pour les pays en développement) (Lau et al., 2012). De plus, si l'Accord de Copenhague prévoit un objectif de température, aucune consigne n'est donnée quant à la manière d'arriver à cet objectif (Lau et al., 2012).

2.2. Accord de Paris : objectifs de température et de réduction d'émissions

En 2014, le GIEC prévient dans son 5^{ème} rapport d'évaluation que si le niveau d'émissions de gaz à effet de serre n'est pas réduit de 25% à 72% d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2010, il sera « plus improbable que probable » d'atteindre l'objectif de rester en-dessous des 2°C d'augmentation de température par rapport aux niveaux préindustriels (Nieto et al., 2018).

En 2015, lors de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP21) de la CCNUCC, plus de 160 pays (aujourd'hui 195) signent l'Accord de Paris, un document juridiquement contraignant (Ari et Sari, 2017 ; Dong et al., 2018 ; Gieseckam et al., 2018). Cet accord confirme la volonté des pays signataires de la CCNUCC de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans la lutte contre le changement climatique. (Kinley, 2017 ; Wei et al., 2019)

a. Objectif de température

L'ambition de l'Accord de Paris est élevée : limiter l'augmentation de température globale bien en deçà de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100 (Gieseckam et al., 2018) en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de température global à 1,5°C (Dong et al., 2018 ; Morgan et al., 2019). L'objectif de 1,5°C est encore possible d'un point de vue géophysique (Millar et al., 2017), mais cela implique de trouver et mettre en œuvre des solutions le plus rapidement possible (Rogelj et al., 2016). De plus, atteindre un niveau de 1,5°C va entraîner des coûts plus élevés que pour atteindre le niveau de 2°C (de Coninck et al., 2018). Un renforcement des capacités à l'échelle mondiale, mais aussi à l'échelle régionale et locale devra être mise en place rapidement pour réduire les coûts et la magnitude des impacts climatiques futurs (Vergara et al., 2015).

L'objectif de température peut se traduire en « budget carbone », c'est-à-dire la quantité maximale de carbone qu'il est encore possible d'émettre pour ne pas dépasser une augmentation

de température de 2°C. Il ne resterait actuellement seulement 150 à 1050 GtCO₂ de budget carbone à l'échelle mondiale (dépendant de la manière de calculer le budget), alors même que l'on émet 41GtCO₂ par an (Figueres et al., 2017).

b. Objectif de réduction d'émissions

L'Accord de Paris prévoit également des « émissions nettes zéro » entre 2050 et 2100, c'est-à-dire « un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et l'absorption par les puits de gaz à effet de serre dans la seconde moitié de ce siècle » (Gieseckam et al., 2018). En effet, d'après des études récentes, la planète peut absorber une certaine quantité de carbone atmosphérique (Jakob et Hilaire, 2015), ce qui limite ses impacts négatifs. Si cette quantité de carbone est dépassée, les conséquences futures pourraient être dramatiques (Libecap, 2014).

La réduction des gaz à effet de serre sera un défi important pour certains pays en développement dont les émissions de gaz à effet de serre augmente avec leur croissance économique (Gieseckam et al., 2018). Cet accord est une occasion pour changer le mode de consommation et de production de ces pays qui se rapproche de plus en plus du mode de consommation occidental (Gieseckam et al., 2018). Jusqu'alors, les pays en développement pouvaient justifier le fait de ne pas avoir atteint leurs objectifs par le faible revenu par habitant de leur pays (Harris, 2010). Ce ne sera maintenant plus le cas conformément au principe du CBDR-RC (Ari et Sari, 2017).

c. Différenciation des pays

L'Accord de Paris se distingue du Protocole de Kyoto entre autre par une nouvelle vision plus conforme à la reconnaissance de souveraineté de chaque pays (Jernnas et Linner, 2019). Les parties peuvent définir leurs propres objectifs volontaires selon des contributions déterminées au niveau national (CDN) (Nieto et al., 2018), qui seront un point de départ pour la planification des mesures d'atténuation à long terme (Wang et Chen, 2019a).

Cette fois-ci, on applique le principe de responsabilités communes mais différenciées de manière plus souple (Wang et Chen, 2019a) : les pays ne sont plus divisés en Annexes, mais s'auto-différencient par leur engagement au niveau national et selon leurs circonstances nationales afin de contribuer à l'atténuation des changements climatiques et à l'adaptation pour respecter un bilan mondial (Jernnas et Linner, 2019 ; Wang et Chen, 2019a). Leur proposition de contribution est ensuite examinée par la CCNUCC. Cette différenciation permet de s'écarter de la vision binaire du début des années 1990, dans un contexte de l'après-guerre froide, et de rentrer dans un contexte de multipolarité et de gouvernance internationale du climat (Jernnas et Linner, 2019).

Les pays signataires ont proposé une différenciation entre les pays selon leur responsabilité historique, l'empreinte écologique, le développement et la capacité technologique (Ari et Sari, 2017). 79 parties insistent également dans leur CDN sur la nécessité de « protéger les populations les plus vulnérables aux effets négatifs du changement climatique », comme les personnes âgées, les personnes handicapées et les réfugiés environnementaux, mais également les personnes dont la survie dépend de l'utilisation des ressources naturelles (Morgan et al., 2019 ; Jernnas et Linner, 2019). L'égalité des genres dans la représentation politique et dans les programmes est également mise en évidence (Jernnas et Linner, 2019). L'action climatique doit également suivre une ligne de conduite conforme aux principes d'équité et de droits de l'Homme. En effet, celle-ci doit tenir compte des défis mondiaux tels que la lutte contre la pauvreté et les inégalités, puisque le changement climatique est un des facteurs qui amplifie les inégalités sociales (Ari et Sari, 2017 ; Höhne et al., 2017 ; Jernnas et Linner, 2019). L'action climatique ne doit donc pas forcément s'inscrire dans un contexte économique libéral tel qu'il existe aujourd'hui, qui ne tient pas en compte l'augmentation des inégalités sociales (Jernnas et Linner, 2019). Il faut cependant noter que l'équité est utilisée par certains pays émergents tels que la Chine ou l'Inde pour justifier la croissance de leurs émissions (Nieto et al., 2018), ce qui peut être un frein à la réalisation des objectifs.

d. Vérification et suivi des engagements

2020 marquera la première année de bilan des CDN. L'année 2020 est une année déterminante en termes de politique climatique car si les émissions ne diminuent pas après 2020, il sera presque impossible d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Le bilan des CDN consistera en une analyse des écarts entre les actions actuelles et les actions annoncées dans les CDN, ainsi qu'une amélioration des CDN existants afin d'atteindre l'objectif de 2°C (Wang et Chen, 2019a). Le GIEC précise que l'effet global des CDN actuels sur les émissions ne sera pas suffisant pour ne pas dépasser une augmentation de 2°C (Rogelj et al., 2018b ; Schaeffer et al., 2019).

Les parties seront également tenues de formuler et communiquer d'ici 2020 leur stratégie à long terme de développement à faible émission de gaz à effet de serre, compatible avec l'objectif de température de l'Accord de Paris et dans lesquelles ils doivent « formuler et communiquer des stratégies de développement à long terme à faibles émissions de gaz à effet de serre » (Schaeffer et al., 2019). Pour se faire, les parties pourront se baser sur les recommandations faites par le GIEC dans son rapport spécial publié en 2018, dans lequel celui-ci décrit « les voies pour limiter le réchauffement climatique à 1.5°C et évalue les transformations mondiales, régionales et sectorielles à court, moyen et long terme, ainsi que les synergies et les compromis pour un développement durable » (Schaeffer et al., 2019).

Des examens de la mise à jour des ambitions et de l'avancement des parties sera mis en place tous les 5 ans également (UNEP, 2018). Les parties seront donc tenues de mettre à jour leurs engagements tous les 5 ans, leur nouveau CDN devant être plus ambitieux que le précédent (Schaeffer et al., 2019 ; UNFCCC, 2015b). Un CDN est considéré comme plus ambitieux si, « s'il est pleinement mis en œuvre, produirait moins d'émissions cumulatives que le CDN existant et pleinement mis en œuvre » (Fransen et al., 2017). Les pays développés devront fixer des objectifs de réduction d'émissions pour l'ensemble de l'économie et les pays en voie de développement devront fixer des objectifs selon leurs capacités (UNEP, 2018). Un bilan mondial sera également

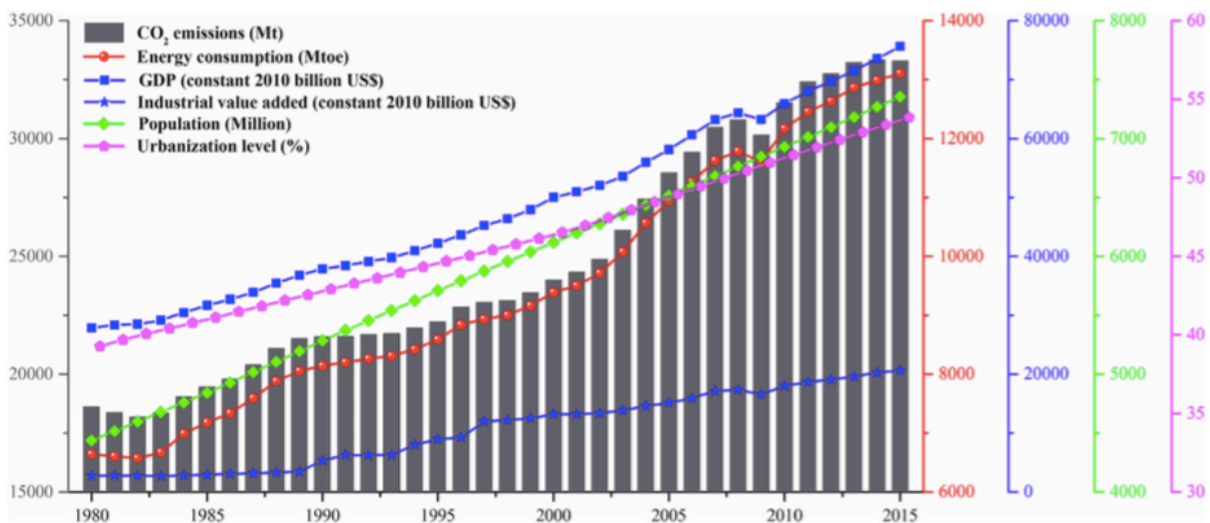
mis en place tous les 5 ans à partir de 2023 pour guider les parties dans la mise en place de leurs nouveaux objectifs et pour évaluer les progrès au niveau mondial (UNEP, 2018).

3. Tendances des émissions anthropiques

3.1. Émissions historiques

Au cours des 20 dernières années, la plupart des études menées ont confirmé que la croissance économique et la consommation d'énergie ont un impact considérable sur les émissions de CO₂ (Mardani et al., 2019), et on le constate dans les émissions historiques. Le développement économique et la croissance démographique ont connu une augmentation comme jamais auparavant au cours des dernières décennies (Dong et al., 2019), notamment à cause de l'industrialisation et l'urbanisation qui se sont développées très vite (Fig. 1). Cela a entraîné une augmentation rapide de la consommation d'énergie, qui a entraîné une augmentation des gaz à effet de serre.

Fig. 1. Historique des émissions mondiales de CO₂, de la consommation d'énergie, du produit intérieur brut (PIB), de la population, de la valeur ajoutée industrielle et du niveau d'urbanisation entre 1980 et 2015.



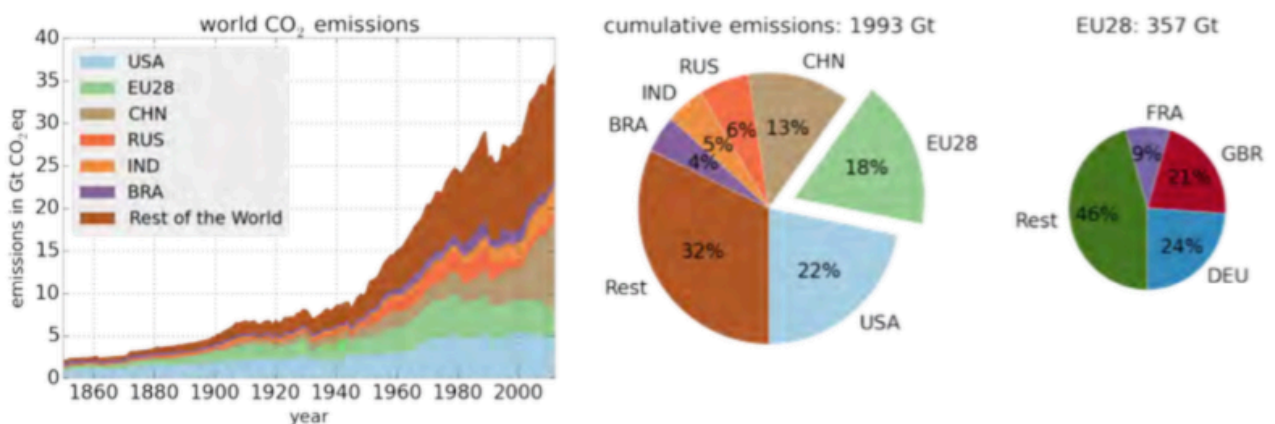
Source: Dong et al., 2019.

Depuis les années 1960, les pays en voie de développement redoutent que la protection de l'environnement soit utilisée pour entretenir leur dépendance économique aux pays développés. Ils considèrent que les pays qui se sont développés en émettant de grandes quantités de gaz à effet de serre devraient prendre leurs responsabilités et réparer leurs erreurs (Jernnas et Linner, 2019).

La responsabilité historique joue donc un grand rôle dans la réalisation d'une action climatique équitable. On peut la mesurer en fonction des parts des émissions mondiales historiques de chaque pays. En plus de leur rôle pour établir la responsabilité historique des États, les données historiques d'émissions permettent de fournir une estimation des impacts de celles-ci sur le changement de température futur.

En termes d'émissions de CO₂, les plus gros émetteurs historiques sont les États-Unis, l'Union européenne et la Chine (fig 2.). Il faut noter également que les pays en développement ont vu leurs émissions augmenter drastiquement au cours de la période récente, tout particulièrement la Chine (Rocha et al., 2015), modifiant sensiblement la répartition mondiale des émissions historiques.

Fig. 2. Émissions historiques et émissions cumulées des principaux émetteurs. Les émissions cumulées des États-membres de l'UE sont présentées dans un graphique séparé.

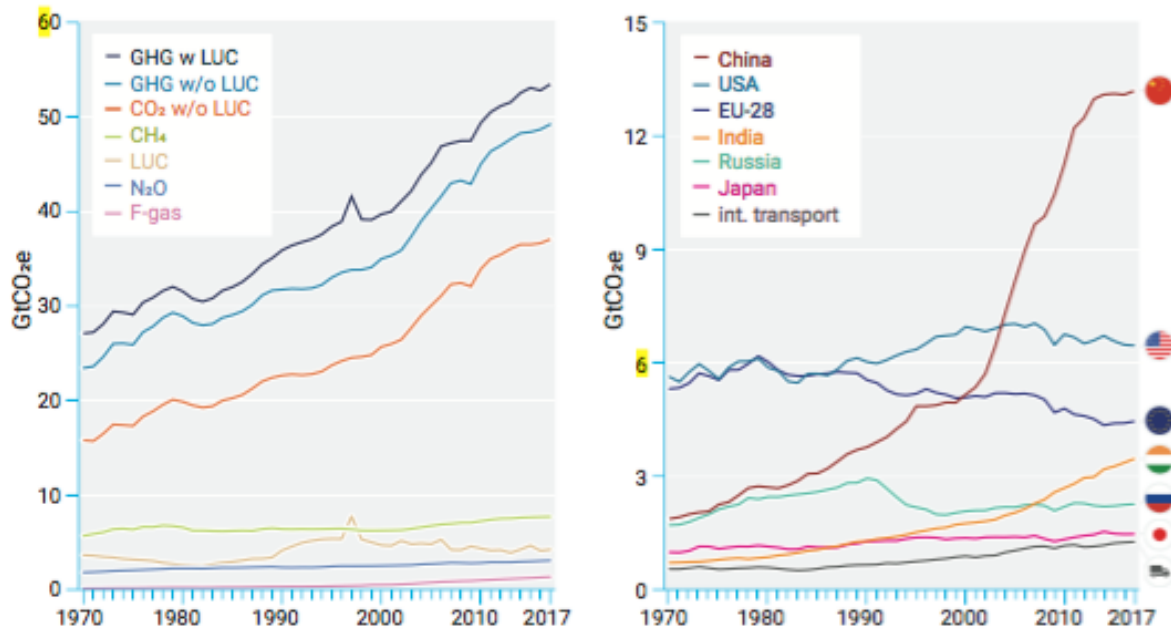


Source: Rocha et al., 2015

On observe actuellement une tendance globale des émissions à la hausse, bien que les émissions des États-Unis soient en baisse depuis 2007 et que les émissions européennes diminuent depuis 1990 (avec une légère hausse depuis 2014) (UNEP, 2018). Pour comprendre cette hausse, il faut observer les tendances d'émissions individuelles des pays (Fig. 3).

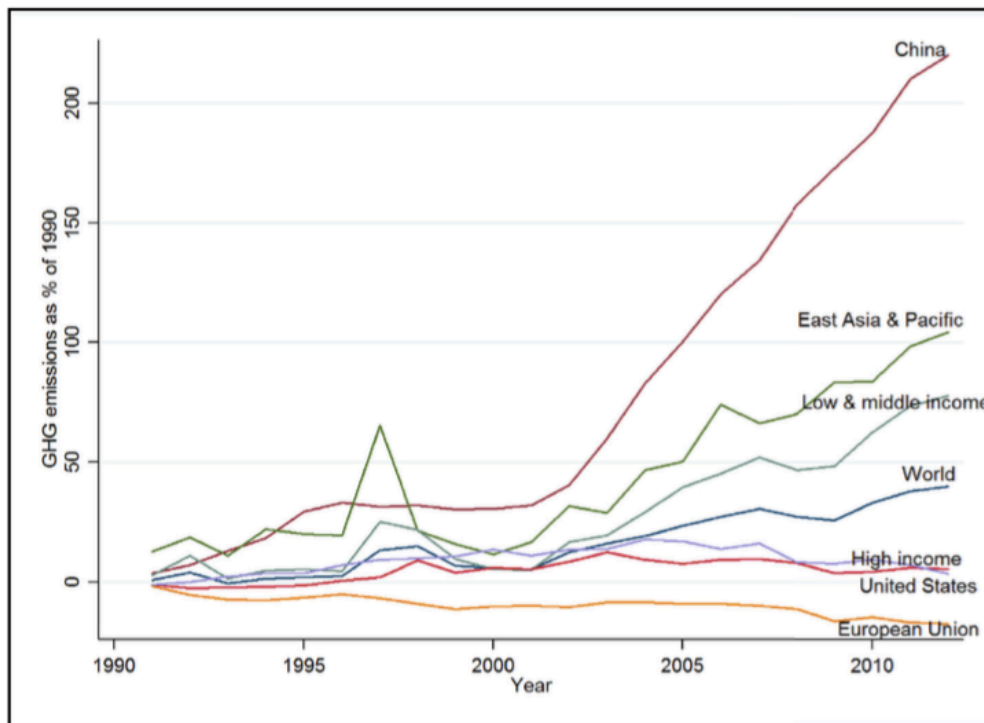
En effet, à elle seule, la Chine est aujourd'hui responsable de 27% des émissions mondiales, avec des émissions qui ont augmenté de 6% par an entre 2004 et 2014 (Li et al., 2017), tandis que l'Inde représente plus de 7% des émissions globales, à cause de sa forte population (UNEP, 2018). Les quatre plus gros émetteurs mondiaux (Chine, États-Unis, EU-28 et Inde) représentent plus de 56% des émissions mondiales, tandis que les membres du G20 en représentent 78%, ce qui rend leur influence sur les tendances mondiales très grande (UNEP, 2018). La tendance actuelle à la hausse des émissions mondiales est surtout due à la hausse des émissions dans les pays en développement, surtout en Asie (Fig. 4) (Maamoun, 2019). Cependant, la part d'émissions des pays en développement comme la Chine ne s'explique pas uniquement par leur responsabilité propre, mais également par le déplacement de la charge environnementale qui a été observé au cours des dernières années : la spécialisation productive, le commerce et la finance ont mené à un transfert de la production polluante vers les régions pauvres (Batra et al., 1998).

Fig. 3. Émissions mondiales de gaz à effet de serre par type de gaz (à gauche) et principaux émetteurs de gaz à effet de serre, à l'exclusion des émissions dues aux changements d'affectation des sols, faute de données fiables (à droite).



Source: UNEP, 2018

Fig. 4. Les émissions de gaz à effet de serre en pourcentage de variation des niveaux d'émissions de 1990.



Source: Maamoun, 2019

3.2. Projections

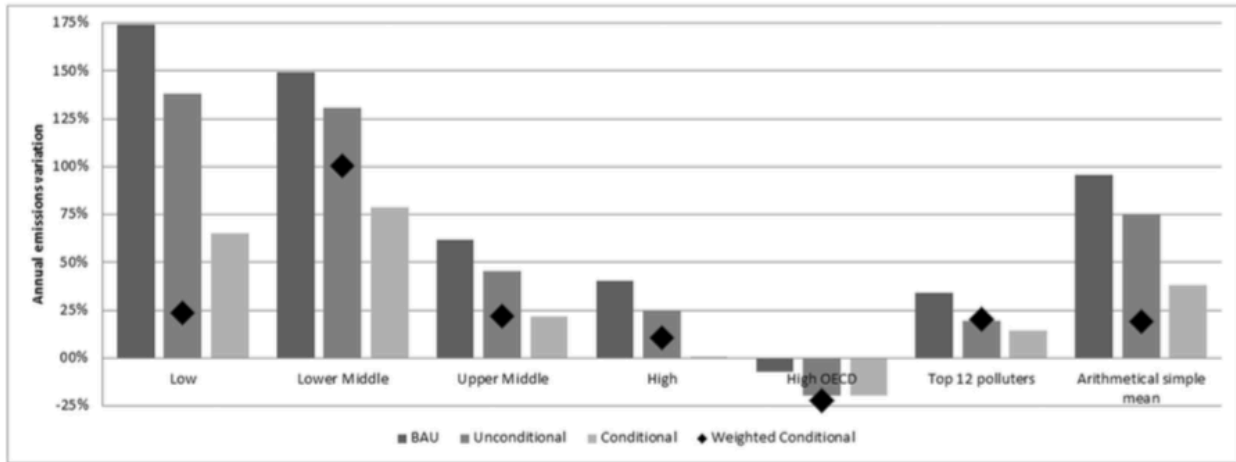
3.2.1. A l'horizon 2030

Les efforts d'atténuation actuels à l'échelle mondiale ne permettront pas d'atteindre les objectifs de réduction d'émissions prévus dans les CDN en 2025-2030 (Wang et Chen, 2019 ; de Coninck et al., 2018 ; UNEP, 2018). En effet, même les efforts des quatre plus grands émetteurs mondiaux ne sont insuffisants. Les États-Unis par exemple ont mis en place des politiques peu ambitieuses et insuffisantes pour atteindre leur objectif de CDN (Wang et Chen, 2019). L'UE semble être sur la bonne voie pour atteindre les engagements repris dans son CDN, mais ceux-ci sont toutefois jugés incompatibles avec l'objectif de température de Paris. L'Inde et la Chine, quant à eux, semblent être dans le droit chemin, mais les émissions futures sont très incertaines au vu du développement économique qu'ils vivent actuellement (Wang et Chen, 2019a ; UNEP, 2018). En effet, la prédiction d'une forte augmentation leur PIB engendrerait une augmentation nette des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 et pourrait annuler les efforts déjà accomplis (Nieto et al., 2018). On prévoit par exemple que l'Inde quadruple ses émissions et que la Chine augmente ses émissions de 39.8%, alors qu'elle devrait les diminuer de 49% par unité de PIB en 2030 (Donc et al., 2018).

Si les politiques d'atténuation annoncées dans les CDN ne sont pas mises en œuvre, on pourrait être témoins d'une augmentation de 31,5% des émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau défini entre 2005 et 2015. Cette augmentation serait principalement engendrée par les 12 pays les plus pollués (Annexe 1) (Nieto et al., 2018).

Nieto et al. (2018) ont établi un graphique (Fig. 5) représentant les projections d'émissions d'ici 2030 selon différents groupes de pays : low income, lower middle income, upper middle income, high income, high income OECD et top 12 emitters. Ces groupes consistent en un classement des pays selon leur revenu (Annexe 2). On observe que les seuls pays dont la variation est négative (c'est-à-dire dont les émissions diminuent) à l'horizon 2030 sont les pays de l'OCDE.

Fig. 5. Variations des émissions par niveau de revenu et différents scenarios de 2005-2015 à 2030.



Source: Nieto et al., 2018.

Les résultats attendus de l'agrégation des NDC sont donc très variables. La réduction d'émission des pays de l'Annexe I et du Brésil pourraient compenser les augmentations d'émission de la Chine et de l'Inde, respectivement de 39.8% et 232.78% (Nieto et al., 2018). Seulement, si l'on retire l'Inde et la Chine du calcul de projection d'émissions à l'horizon 2030, les émissions mondiales pourraient diminuer jusqu'à 4% dans le scénario conditionnel, alors qu'elles augmenteraient légèrement (2.5%) dans le scénario sans condition (Nieto et al., 2018).

Si l'on veut atteindre la neutralité carbone, il faudrait atteindre le pic d'émissions mondiales le plus vite possible pour ensuite pouvoir les diminuer rapidement par la suite, dans le but d'arriver à des émissions neutres en carbone d'ici 2050 (Schaeffer et al., 2019). On considère qu'un pays a atteint son pic d'émissions s'il a atteint son niveau maximal d'émissions au moins cinq ans avant l'année d'inventaire des gaz à effet de serre et s'il s'est engagé à réduire ses émissions sous ce niveau maximal dans le futur. Même si les émissions augmentent encore après l'année considérée comme année de pic, cette année restera l'année « de pointe » tant que les émissions futures sont inférieures au niveau de cette année (UNEP, 2018).

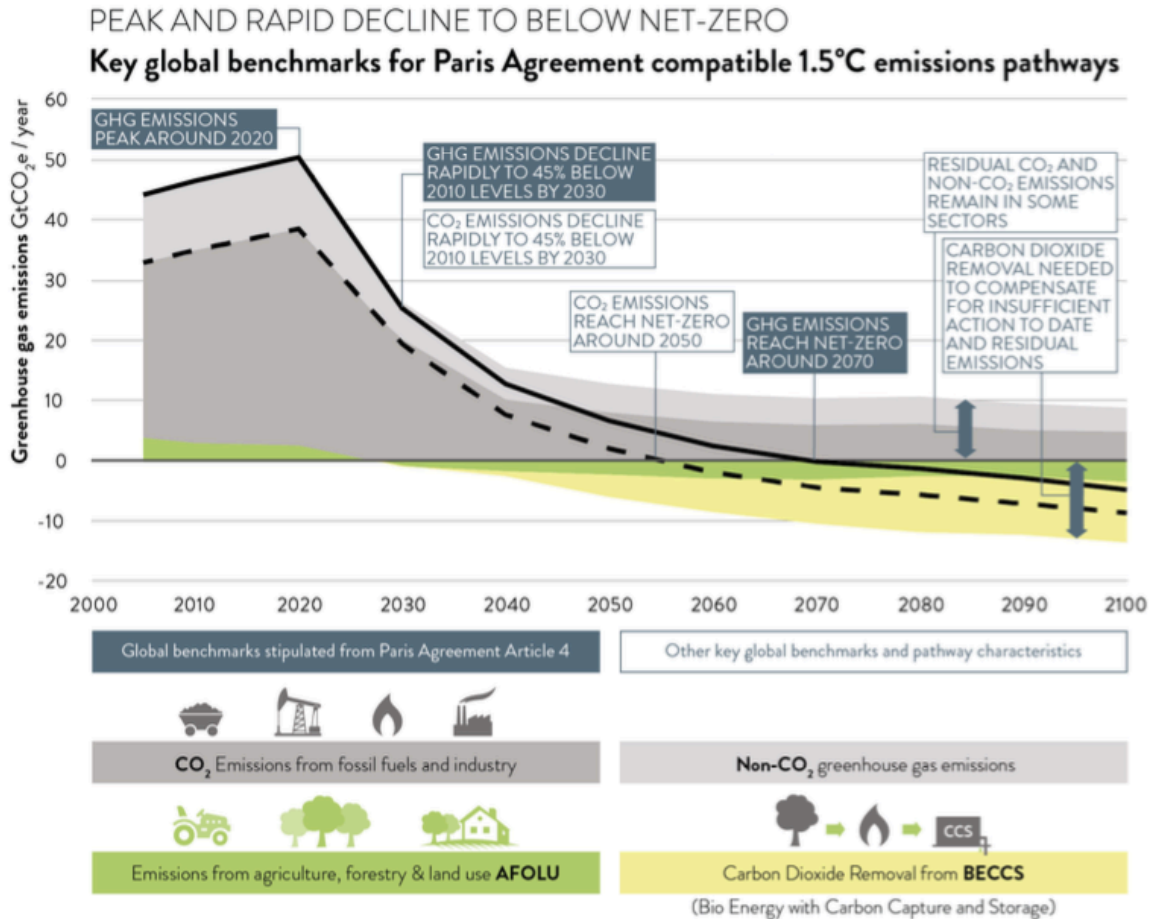
D'après le Programme pour l'Environnement des Nations Unies (ou United Nations Environment Programme, UNEP), trois facteurs influencent les pics d'émissions mondiaux et la capacité d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris : « le moment des pics d'émissions nationaux et mondiaux, le niveau des pics d'émissions et la capacité de diminution des émissions après le pic ». Les pays doivent donc réduire le niveau de leur pic d'émission et réduire leurs émissions de manière drastique après avoir atteint ce pic (Levin et Rich, 2017). Si les pays respectent les engagements annoncés dans leurs CDN, on prévoit que 57 pays représentant 60% des émissions mondiales auront atteint leur pic d'ici 2030 (Levin et Rich, 2017), puisque les pays de l'Annexe I (sauf la Turquie) prévoient d'atteindre leur pic d'ici 2020 et 15 pays non compris dans l'Annexe I (dont la Chine pour le CO₂) prévoient de l'atteindre d'ici 2030 (UNEP, 2018). Cependant, cela ne sera pas assez pour atteindre un pic d'émissions au niveau mondial (Annexe 3) (UNEP, 2018).

De 2014 à 2016, on a pu observer un ralentissement des émissions de gaz à effet de serre grâce à une amélioration de l'efficacité énergétique et carbonique, alors même que l'économie continuait de croître, ce qui laissait croire à un pic d'émissions. Cependant, celles-ci ont recommencé à croître depuis lors (+1,2% en 2017), ce qui signifie que les progrès réalisés n'ont eu qu'un impact de courte durée (UNEP, 2018).

Il serait impossible, faute de temps, d'atteindre les objectifs de neutralité carbone d'ici 2050 si l'on retarde l'année de pic des émissions à 2030 (Figueres et al., 2017). Un retardement de ces pics signifierait que les pays devront diminuer leurs émissions de 10GtCO₂ en plus par rapport aux réductions prévues dans leurs NDC actuels. D'ici 2050, cela augmenterait jusqu'à 15GtCO₂, soit 50% en plus que les réductions d'émissions prévues par les CDN (Wang et Chen, 2019a). Si l'on veut que l'objectif soit atteint avec le meilleur ratio efficacité/coût, il faut prendre des mesures le plus rapidement possible. Il faudrait une réduction d'émissions globales d'au moins 30% en 2030 pour être dans une tendance approchant l'objectif des 2°C, et 45% pour l'objectif de 1.5°C (Wang et Chen, 2019a ; IPCC, 2018). Pour cela, toutes les parties doivent renforcer leur engagement le plus tôt possible.

Schaeffer et al. (2019) ont élaboré un graphique (Fig. 6) illustrant la trajectoire d'émissions et les moments clés à considérer pour atteindre les objectifs de température : après le pic d'émissions mondiales vers 2020, si des politiques ambitieuses de décarbonation de tous les secteurs sont mises en place, les émissions devraient diminuer de 45% en 2030 par rapport aux niveaux de 2010. Vers 2050, il faudrait avoir atteint la neutralité carbone. Ils notent également que, outre le CO₂, les émissions d'autres gaz à effet de serre (tels que le méthane et le protoxyde d'azote émis par l'agriculture, l'industrie et d'autres secteurs, par exemple) doivent également être diminuées entre 80 et 90% car elles représentent une part d'émissions non négligeable. Les voies d'élimination du dioxyde de carbone (puits de carbone naturels, puits de carbone nécessitant une intervention technologique, et puits de carbone combinant ces derniers) devraient permettre d'éliminer les émissions restantes.

Fig. 6. Illustration des trois repères de l'article 4.1 de l'Accord de Paris pour la mise en œuvre de l'article 2.1 (boîtes bleu foncé) et des repères mondiaux de décarbonisation (boîte blanche).



Source: Schaeffer et al., 2019

3.2.2. A long terme

D'après le principe de responsabilités communes mais différenciées, les pays développés devraient atteindre l'objectif net zéro avant 2050 (Gieseckam et al., 2018). D'après Rockstrom et al. (2017), il faudrait diminuer les émissions globales de gaz à effet de serre de moitié tous les 10 ans pour atteindre l'objectif de température de 2°C à 75% de probabilité.

Grâce aux scénarios mis en place par le GIEC, on peut estimer les émissions globales futures et donc l'augmentation de température. Selon le GIEC, dans le scénario « business as usual », c'est-à-dire le scénario selon lequel on ne met en place aucune nouvelle politique climatique, la température mondiale pourrait atteindre une augmentation entre 3,2°C et 5,4°C d'ici 2100 (IPCC, 2014), ce qui serait catastrophique puisque le GIEC met en garde sur le fait qu'une augmentation de température de 3°C à 4°C pourrait engendrer une extinction massive des espèces, des problèmes de santé ainsi qu'un accès limité à l'eau potable et à la nourriture (Nieto et al., 2018). Si toutes les CDN sont mises en œuvre, l'augmentation serait de 2,6°C à 3,1°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100 (Rogelj et al., 2016). Une mise en œuvre des CDN inconditionnels pourrait amener à des températures entre 2,9°C et 3,4°C supérieures aux niveaux préindustriels d'ici 2100 (UNEP, 2018). Ce scénario n'inclut pas les pays qui n'ont pas de CDN ou qui n'ont inclus qu'un objectif conditionnel. Une telle augmentation signifierait que l'on n'aura pas atteint le net zéro et que les températures continueront à augmenter (UNEP, 2018).

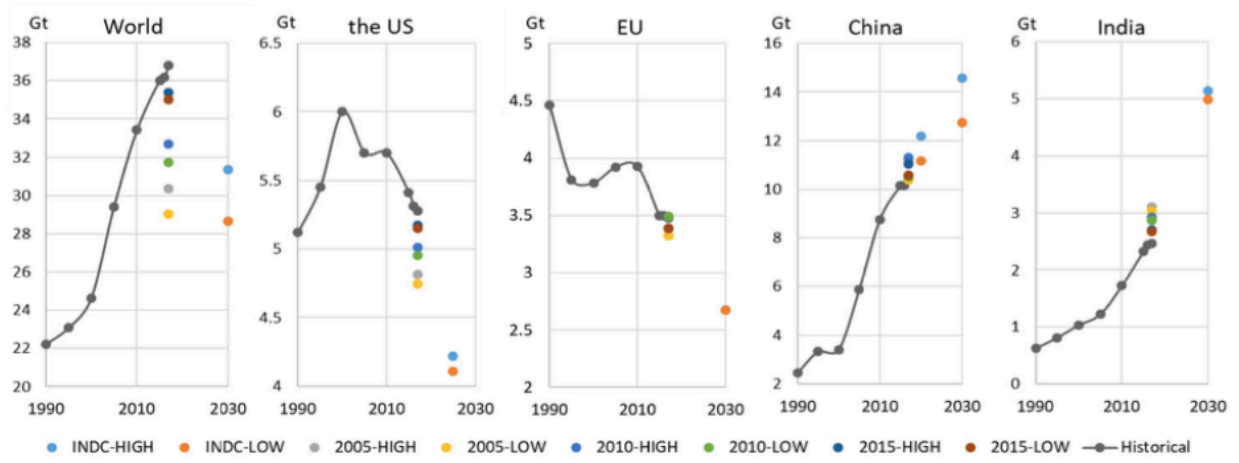
3.3. Écart entre les objectifs et les trajectoires actuelles (« mitigation gap »)

Le « mitigation gap » est défini par l'UNEP (2018) comme « la différence entre les émissions mondiales totales de gaz à effet de serre compatibles avec les limites de température de 2°C et 1.5°C et les émissions mondiales totales estimées de gaz à effet de serre résultant de la mise en œuvre intégrale des CDN ».

En 2017, les émissions mondiales étaient de 1,4 à 7,7 Gt supérieures à ce qui était prévu selon les CDN (Wang et Chen, 2019a). Bien que les gains en efficacité énergétique soit passés de 1,3% en 2000-2010 à 1,8% en 2010-2015 et que la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie ait atteint 18% en 2015 (IRENA, 2018), la tendance des émissions n'atteindrait pas les niveaux prévus grâce aux mesures prises dans les NDC (Wang et Chen, 2019a).

Wang et Chen (2019) ont construit une estimation des trajectoires d'émissions actuelles liées à l'énergie et l'objectif que celles-ci devraient atteindre suivant différents scénarios au niveau mondial et pour les régions les plus polluantes : les États-Unis, l'Union européenne, la Chine et l'Inde (Fig. 7). Le résultat est sans équivoque : même si les États-Unis et l'UE décroissent leurs émissions très vite, il reste encore une grande marge de manœuvre au niveau mondial.

Fig. 7. Émissions historiques et objectifs des NDC.



Source : Wang et Chen, 2019a.

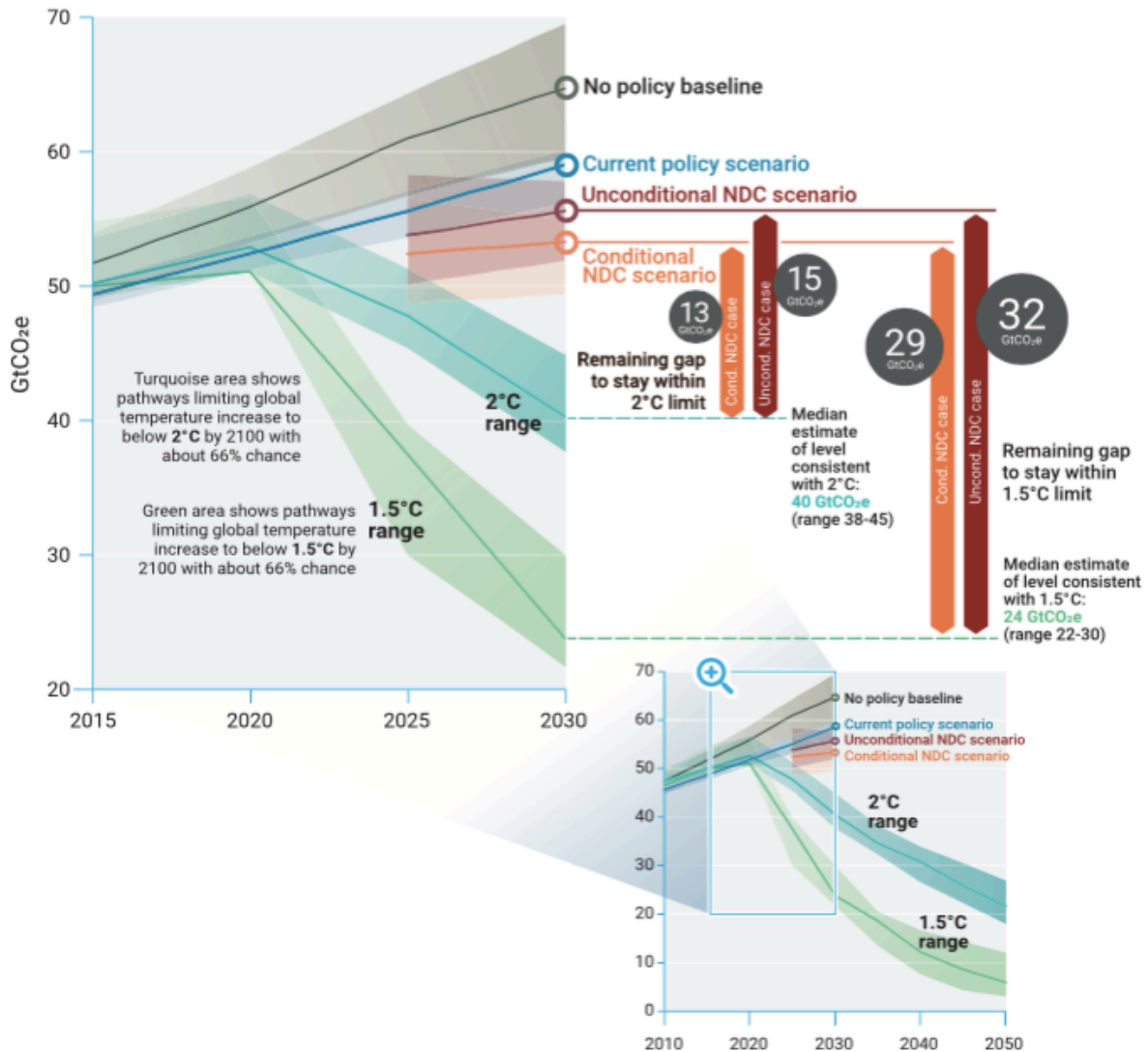
L'UNEP (2018) a développé un graphique (Fig. 8) illustrant le « mitigation gap » (voir Annexe 4 pour les données quantitatives). Pour ne pas dépasser les 2°C de réchauffement, les émissions globales de gaz à effet de serre devraient être en 2030 d'environ 40GtCO_{2e}, et d'environ 24GtCO_{2e} pour atteindre un objectif de 1.5°C de réchauffement maximal. Les écarts d'émissions ont été calculés (fourchette d'émissions, voir annexe 4) par rapport à différents scénarios, du plus catastrophique au moins catastrophique :

- Tout d'abord le scénario sans nouvelles mesures climatiques depuis 2005 (« no policy baseline »). Dans ce scénario de référence, les émissions globales de gaz à effet de serre seraient de 65GtCO_{2e} en 2030, soit de 25GtCO_{2e} au-dessus des émissions maximales pour limiter le réchauffement à 2°C.
- Le scénario d'augmentation de température avec les politiques actuelles mises en place (« current policy scenario »). La mise en place des politiques actuelles permettraient en

théorie de limiter les émissions globales à 59GtCO₂e en 2030, soit de réduire les émissions globales de 6GtCO₂e par rapport au scénario précédent.

- Le scénario de mise en œuvre inconditionnelle des NDC. Dans ce scénario, on suppose que les mesures d'atténuation de leurs CDN sont mises en œuvre, sans conditions. Il n'inclut pas les pays qui n'ont pas de CDN ou qui n'ont inclus qu'un objectif conditionnel. Ces derniers sont inclus dans le groupe « current policy scenario ». Ce scénario prévoit une augmentation des émissions jusqu'à 55GtCO₂e en 2030, soit seulement 3GtCO₂e de moins qu'avec les politiques actuelles. Cela signifie donc 15GtCO₂e de plus que le scénario pour lequel on limiterait le réchauffement à 2°C, et 32GtCO₂e de plus que le scénario 1.5°C.
- Le scénario de mise en œuvre conditionnelle des NDC. Dans ce scénario, les pays ont mis en œuvre les mesures d'atténuation conditionnelles et inconditionnelles de leur CDN. Ce scénario prévoit des émissions globales de 53GtCO₂e en 2030, soit 13GtCO₂e de plus que le scénario 2°C et 29GtCO₂e de plus que le scénario 1.5°C.

Fig. 8. Les émissions mondiales de gaz à effet de serre selon différents scénarios et l'écart des émissions en 2030 (estimation médiane et fourchette du 10ème au 90ème percentile).



Source: UNEP, 2018.

Ceci démontre bien qu'il faut augmenter l'ambition et l'action climatique drastiquement. En effet, selon ces scénarios, on n'atteindra pas le pic d'émissions globales en 2020, ni même en 2030. Pour se faire, on devrait diviser les émissions globales par deux, voire par trois, pour atteindre l'objectif d'augmentation de température maximale de 2°C et diviser les émissions par 5 pour l'objectif de 1.5°C (UNEP, 2018).

4. Réduction du mitigation gap

4.1. Réduction du mitigation gap : une combinaison d'actions

Pour atteindre les objectifs, fixés à l'échelle nationale ou internationale, il va falloir mettre en place des objectifs sectoriels (Gota et al., 2018). Il faudra faire des changements à la fois sociotechniques, c'est-à-dire des transformations dans les processus sociaux et institutionnels, mais aussi effectuer des changements socio-écologiques, changer les systèmes économiques et les systèmes énergétiques à faibles émissions (Gillard et al., 2016, Eyre et al., 2018 ; de Coninck et al., 2018). Pour se faire, il sera nécessaire de mettre en place des approches multidisciplinaires, parmi lesquelles les dimensions scientifiques, technologiques et sociales (de Coninck et al., 2018). De plus, il faudra coordonner les politiques dans tous les secteurs (UNEP, 2018).

Il s'agira de combiner des changements institutionnels, de comportement et de l'utilisation des sols, tant au niveau mondial que régional (Pedde et al., 2019). Le rapport spécial du GIEC le souligne également, affirmant que « le renforcement de la gouvernance à plusieurs niveaux, des capacités institutionnelles, des instruments politiques, de l'innovation technologique, du transfert et de la mobilisation des financements, ainsi que des changements dans le comportement humain et les modes de vie sont des conditions favorables qui améliorent la faisabilité d'atteindre l'objectif des 1,5°C » (IPCC, 2018). Une harmonisation des échelles de gouvernance (Geels et al., 2017), d'une gouvernance à différents niveaux (Euston-Brown, 2017) et des différentes institutions (Abbott, 2012) sera également nécessaire.

Les politiques mises en place doivent donc être interdisciplinaires (de Coninck et al., 2018) et doivent fusionner l'adaptation et l'atténuation (Göpfert et al., 2018) mais également mélanger la politique et la science (Figueres et al., 2017). L'IEA (2017b) souligne tout de même que la majorité des réductions d'émissions doivent se faire dans le secteur de la production d'électricité et de son utilisation finale (transports, bâtiments et industrie).

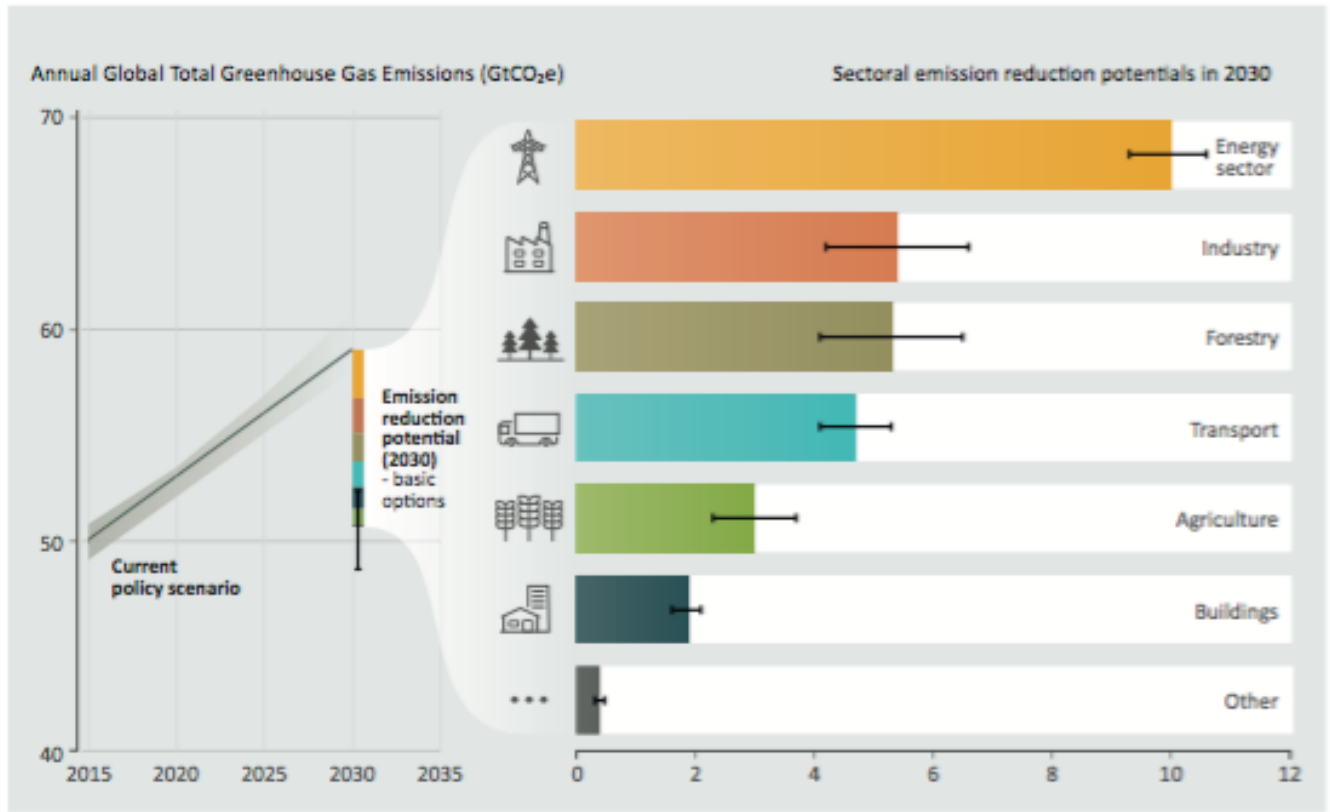
Il n'existe pas encore aujourd'hui de consensus dans le corps scientifique quant aux approches qu'il faudrait mettre en place en priorité afin de modifier les trajectoires d'émissions actuelles. Certains auteurs estiment qu'une transformation sociétale pourrait limiter l'augmentation de température (Hermwille, 2016 ; Rockström et al., 2017 ; Westley et al., 2011), tandis que d'autres estiment que le recours à la géo-ingénierie est l'outil que l'on doit cibler (Akimoto et al., 2017). Cependant, ce sera probablement le rapport coût-efficacité qui déterminera quel secteur pourra se décarboner le plus rapidement (Gota et al., 2018).

Il n'y a donc pas de solution unique pour résoudre le problème du changement climatique, mais il est nécessaire de mettre en place simultanément des stratégies systémiques et gouvernementales (de Coninck et al., 2018). Ce chapitre vise à présenter les différentes composantes d'un portefeuille d'actions à mettre en place pour réduire nos émissions et atteindre l'objectif de température de 1.5°C-2°C, mais aussi à mettre en évidence l'interdépendance qui existe entre les différents secteurs, montrant ainsi la nécessité d'une combinaison d'actions.

4.2. Changements systémiques

Parmi les changements systémiques à mettre en place, cinq seront abordés : le système énergétique, le transport, l'industrie, l'usage des sols et les villes et les infrastructures. En effet, si l'on combine le potentiel de réduction d'émission de ces secteurs, cela aboutirait à une réduction de 33GtCO₂e par an (fourchette de 30 à 36GtCO₂e) en 2030 par rapport à un scénario de politiques actuelles (Fig. 9), et jusqu'à 38GtCO₂e par an (fourchette de 35 à 41GtCO₂e) si des mesures additionnelles sont prises (Annexe 5) (UNEP, 2017). Ces réductions d'émissions seraient suffisantes pour résorber le mitigation gap d'ici 2030 pour un objectif de 2°C avec plus de 66% de probabilité, et 1,5°C avec une probabilité entre 50% et 66% (UNEP, 2017).

Fig. 9. Potentiels fondamentaux de réduction totale des émissions par rapport au scénario politique actuel en 2030.



Source: UNEP, 2017.

4.2.1. Système énergétique

Au cours des 20 dernières années, la plupart des études menées ont confirmé que la croissance économique et la consommation d'énergie ont un impact considérable sur les émissions de CO₂ (Mardani et al., 2019). En effet, le secteur de l'énergie pourrait être responsable de 21,3GtCO₂ d'émissions en 2030 si l'on garde les mêmes politiques qu'aujourd'hui (IEA, 2016). Dans leur étude, Mardani et al. (2019) affirment que la majorité des études confirment que les émissions de CO₂ sont corrélées positivement avec la croissance économique et qu'il est nécessaire de comprendre le lien entre croissance économique et émissions de CO₂ pour pouvoir mettre en place des politiques énergétiques durables.

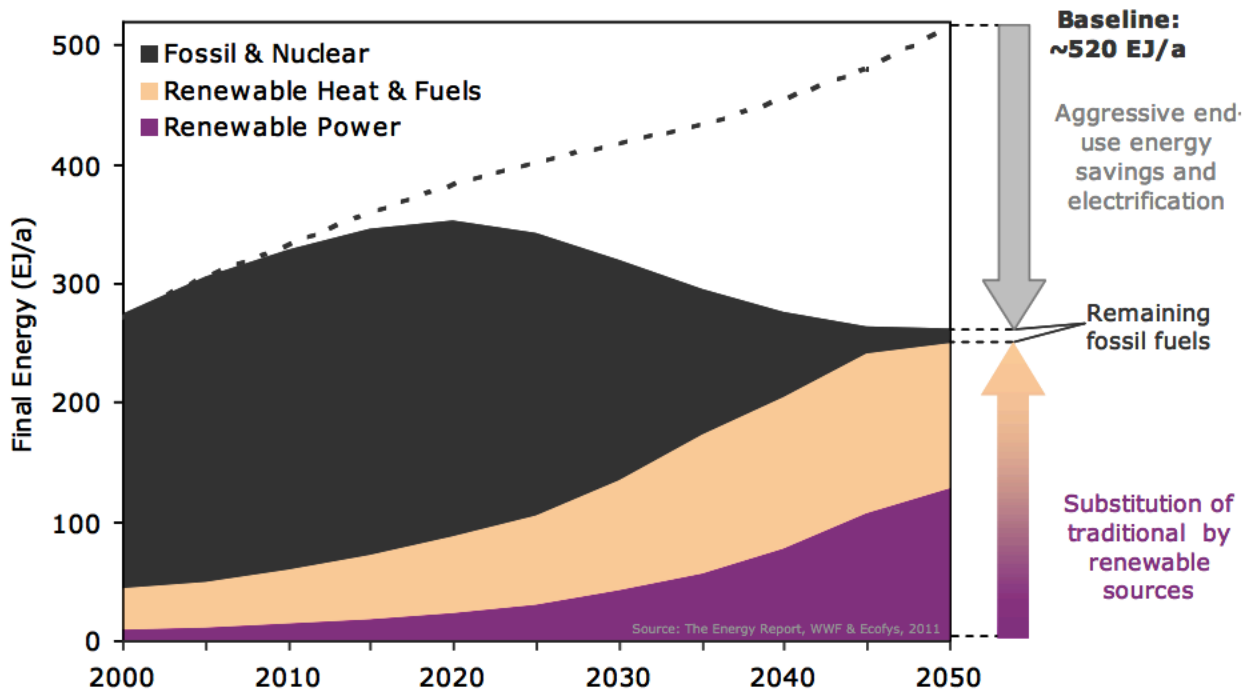
Cependant, la demande énergétique ne peut continuer de croître indéfiniment. L'Agence internationale de l'énergie (International Energy Agency, IEA en anglais) (2016) a affirmé que

même avec de nouvelles explorations pétrolières, celles-ci pourraient être insuffisantes pour répondre à la demande étant donné que les quantités à extraire diminuent de plus en plus. S'ajoute à cela le fait que certains pays ont atteint le pic pétrolier conventionnel (IEA, 2010), et que l'extraction du pétrole non conventionnel est plus coûteuse et polluante que celle du pétrole traditionnel et a une performance énergétique inférieure au pétrole traditionnel (Nieto et al., 2018). De plus, si l'on veut atteindre les objectifs climatiques et mener à bien la transition vers des économies à faible intensité de carbone, il faut laisser une grande partie des combustibles fossiles sous terre : respectivement 82% des réserves de charbon, 49% des réserves de gaz naturel et 33% des réserves de pétrole devraient rester sous terre (McGlade et Ekins, 2015, Nyambuu et Semmler, 2019).

Les sources d'énergies desquelles nous sommes dépendants aujourd'hui pourraient donc se faire rare à l'avenir si l'on ne trouve pas de source d'énergie alternative (Nyambuu et Semmler, 2014). Maintenir le système de consommation et de production actuel sans combustibles fossiles sera donc compliqué sans une réduction de la consommation d'énergie. Le directeur des stratégies de la CCNUCC a affirmé qu'il faut une « transformation fondamentale de la manière dont nous utilisons et produisons de l'énergie » (Thorgeirsson, 2015).

Pour atteindre ces objectifs, deux axes devront être exploités (Fig.10) : d'une part, il faudra diminuer drastiquement la demande d'énergie, c'est-à-dire améliorer l'efficacité énergétique et utiliser l'énergie de manière rationnelle, et d'autre part il faudra substituer les combustibles fossiles par les énergies renouvelables (WWF et Ecofys, 2011). Pour arriver à cela, il faudrait changer les modes de consommation et de production en mettant en place des politiques de gestion de la demande (Creutzig et al., 2016) surtout dans les pays de développement et les pays émergents (Nieto et al., 2018). Il faut cependant faire attention de ne pas arriver au « paradoxe vert », c'est-à-dire une redynamisation du marché du pétrole avec la diminution de la demande et l'augmentation des alternatives et donc d'une diminution des prix, qui augmente à nouveau la demande (Nieto et al., 2018).

Fig. 10. Évolution de l'approvisionnement énergétique dans le scénario énergétique, montrant les principaux développements



Source : WWF et Ecofys, 2011.

Aujourd'hui, il est possible d'améliorer l'efficacité énergétique d'un point de vue technologique, économique et social, mais cela ne suffit pas encore à atteindre l'objectif de 1,5°C (van Vliet et al., 2016 ; Nyambuu et Semmler, 2019). Pour se faire, il faudra également avoir recours à une électrification généralisée, alimentée par des énergies renouvelables, à la bioénergie et les biocarburants et à l'énergie nucléaire. Le captage et stockage du carbone (CCS) sera également nécessaire. Ce dernier point sera abordé dans la section 4.4.2.

a. Électrification généralisée et énergies renouvelables

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il faudra substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables, ce qui nécessitera une électrification généralisée. L'électrification généralisée et sa production décentralisée est donc au centre des préoccupations des pays signataires de l'Accord de Paris, en particulier dans les pays les moins avancés (PMA), où le charbon de bois est la source principale d'énergie pour le chauffage et la cuisson (Nieto et al., 2018). D'autres des pays comme les États-Unis dépendent également beaucoup du charbon et du gaz puisque, ensemble, ceux-ci fournissent près de 66% de l'électricité aux USA (Wang et al., 2019a).

La plupart des NDC préconisent de passer à un nouveau mélange énergétique, en incluant plus d'énergies renouvelables et/ou plus d'énergie nucléaire (Nieto et al., 2018). On observe d'ailleurs une substitution progressive (quoique insuffisante) de la part d'énergie fossile dans la consommation totale d'énergie par des énergies propres dans certaines régions telles que les États-Unis, l'UE et les pays de l'OCDE, et une augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables dans les pays en voie de développement, particulièrement en Chine depuis les années 90 (Nyambuu et Semmler, 2019). En effet, il existe un consensus scientifique sur le fait qu'un mélange énergétique pourrait aider à la résilience des systèmes énergétiques (Parkinson et Djiali, 2015). Celle-ci peut être augmentée grâce aux micro-réseaux (Liu et al., 2017), notamment parce qu'ils ont une capacité l'îlotage, c'est-à-dire que le réacteur fonctionne toujours si le réseau électrique est défaillant, et qu'il est possible d'alimenter ces réseau par des énergies renouvelables (Hussain et al., 2019)

Cependant, les solutions ne semblent pas pouvoir totalement compenser nos besoins énergétiques actuels et on note déjà une perturbation de la production d'électricité, qui pourrait s'empirer dans le nombre de perturbations et dans la durée (van Vliet et al., 2016). Pour assurer une certaine sécurité et capacité de production, il est donc nécessaire de trouver des sources alternatives d'énergie capables de combler ce déficit (Panteli et Mancarella, 2015).

Si toutes les énergies renouvelables ont attiré l'attention des investisseurs depuis le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC en 2013, ce sont les énergies solaire, grâce à la réduction du prix du photovoltaïque, et éolienne qui ont connu la plus grande croissance (de Coninck et al., 2018).

La production d'énergie à partir d'énergie renouvelables dépend des conditions géophysiques de l'endroit où cela est mis en œuvre. Par exemple, l'énergie solaire à l'échelle des consommateurs pourrait grandement contribuer à la production d'électricité dans des régions ensoleillées (de Coninck et al., 2018) (Nyholm et al., 2017). Aujourd'hui, la production d'énergie solaire est d'environ 708GW (UNEP, 2017). On estime que l'énergie solaire pourrait produire entre 7100 et 9100GW par an en 2030 (Breyer et al., 2017), ce qui représenterait une réduction d'émissions de 5,5 à 7,2GtCO₂ par an en 2030 (UNEP, 2017). Cependant, pour atteindre ces objectifs, il faudrait augmenter la capacité photovoltaïque solaire installée de 26 à 29% par an (Breyer et al., 2017).

La capacité de production d'électricité provenant de l'énergie éolienne, quant à elle, était de 487GW à l'échelle mondiale fin 2016 (REN21, 2016), tandis qu'elle est d'environ 940GW dans le scénario de politiques actuelles (UNEP, 2017). On pourrait atteindre une capacité installée de production d'électricité éolienne entre 2110 à 3064GW en 2030 (Teske et al., 2015), ce qui représenterait une réduction d'émissions entre 2,6 et 4,1GtCO₂ en 2030 par rapport au scénario de politique actuelle (UNEP, 2017).

Il existe encore un débat pour savoir si l'utilisation d'énergies renouvelables pourrait suffire à subvenir à l'ensemble des besoins énergétique mondiaux. Si certains estiment que cela pourrait être le cas (Jacobson et al., 2017 ; Devogelaer et al., 2013), d'autres pensent qu'elles ne seraient pas suffisantes pour produire l'énergie nécessaire à notre modèle économique actuel (Heard et al., 2017). S'ajoute à cela le fait que le passage aux énergies renouvelables pourrait être difficile parce qu'il dépend de changements politiques et d'objectifs propres à chaque pays, même s'il

pourrait aider les pays en développement à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (Popp, 2015) et assurer leur dépendance énergétique.

b. Bioénergie et biocarburants

La bioénergie et les biocarburants sont tous les deux issus de la biomasse : la bioénergie vient de l'énergie produite avec de la biomasse, tandis que les biocarburants en sont une sous-catégorie (carburants produits avec de la biomasse pour les transports) (de Coninck et al., 2018). Ces technologies pourraient jouer un rôle important pour diminuer les émissions de l'aviation et du transport maritime, secteurs pour lesquels il existe actuellement peu d'alternatives technologiques, ou encore dans le transport routier de marchandises (de Coninck et al., 2018). On estime que la biomasse a un potentiel de réduction d'émission non négligeable, puisqu'il serait de 0,85GtCO₂ par an, si l'on conserve les politiques actuelles (UNEP, 2017).

Cependant, les scientifiques s'accordent sur le fait que le potentiel énergétique de la biomasse est limité (de Castro et al., 2014) car au-dessus d'une certaine limite de production d'énergie (100 EJ par an), cela pourrait avoir un effet négatif puisque cela engendrerait une compétition de l'exploitation des terres entre les terres utilisées pour la biomasse et celles utilisées pour l'agriculture, résultant en une augmentation du prix de production de la nourriture et donc du prix de celle-ci (Creutzig et al., 2015 ; Nieto et al., 2018). De plus, l'intensité carbone des bioénergies divise encore les scientifiques puisqu'elle dépend de plusieurs variables telles que la gestion de l'énergie produite (Baul et al., 2017) et les émissions directes et indirectes liées à l'utilisation des terres (Harris et al., 2015).

c. Énergie nucléaire

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire fait débat et n'est pas toujours acceptée socialement, principalement à cause de la préoccupation de la population quant aux risques d'accidents

nucléaires et à la gestion des déchets nucléaires (Bruckner et al., 2014). De plus, Il n'existe pas encore de consensus scientifique sur les coûts de l'énergie nucléaire (Kooimey et al., 2017).

Cette source d'énergie comporte cependant plusieurs avantages puisqu'elle nécessite moins de terre que les autres sources (Cheng et Hammond, 2017) et présente peu de risques pour la santé (Hirschberg et al., 2016). Dans son scénario 450, l'IEA (2016), affirme que l'énergie nucléaire pourrait permettre une augmentation de capacité de production d'énergie de 154GW par rapport au scénario politique actuel, ce qui résulterait en une diminution de 0,87GtCO₂ par an en 2030 (UNEP, 2017). Cependant, bien qu'elle puisse être perçue comme une bonne solution technologique à court terme, l'énergie nucléaire pourrait voir ses ressources limitées dans les prochaines décennies (Nieto et al., 2018).

4.2.2. Transport

Aujourd'hui, 28% de la demande énergétique finale mondiale vient des transports. Cela représente 23% des émissions de CO₂ (Schaeffer et al., 2019 ; IEA, 2017b), soit un total de 9,7GtCO₂ en 2030 dans le scénario de politique actuelle (UNEP, 2017), et ces émissions pourraient encore augmenter entre 13 et 27GtCO₂eq d'ici 2050, notamment à cause de la croissance économique des pays de développement, et donc de la demande de transport dans ces pays (Gota et al., 2018).

A cause des changements démographiques, comportementaux et économiques, la demande de transport et les émissions associées au transport augmentent plus vite que pour les autres secteurs (Creutzig et al., 2015b). Si l'on veut réduire les émissions de gaz à effet de serre et atteindre les objectifs de température de l'Accord de Paris, le secteur du transport devrait donc être un secteur prioritaire, mais on observe un manque général de priorisation des mesures dans le secteur des transports dans les CDN des parties (Gota et al., 2018).

Aujourd'hui encore, la plupart des études confirment que le secteur du transport est un secteur difficile à décarboner (Gota et al., 2018). En effet, 93% du secteur des transports serait actuellement alimenté grâce aux combustibles fossiles (IEA, 2017b). La combinaison de son manque de diversification énergétique et l'augmentation de la demande rendent la décarbonation de ce secteur plus difficile que d'autres. De plus, la décarbonation du transport nécessite un financement important. L'IEA (2017) déclare toutefois que ce financement serait inférieur à celui qui sera nécessaire si aucune politique n'est mise en place.

Pour atteindre les objectifs, il faudrait réduire les émissions mondiales liées aux transports de 70% par rapport aux niveaux de 2010 d'ici 2050 (de Coninck et al., 2018). L'objectif de réduction pour atteindre 1,5°C est nettement plus ambitieux que l'objectif de réduction pour un objectif de 2°C, puisqu'il signifierait une diminution de 2,4 à 3,2Gt supérieure à l'objectif de 2°C en 2050 (Rogelj et al., 2015).

Aujourd'hui, environ deux tiers des mesures mises en place sont liées à l'efficacité énergétique ou la décarbonation des carburants, contre un tiers des mesures qui sont orientées vers un changement de comportement en matière de déplacement (Gota et al., 2018). Pour arriver à une transformation efficace du secteur du transport, il faut à la fois mettre en place des mesures à moyen et long terme pour une décarbonation effective, et mettre en place des mesures à court terme pour accélérer la commercialisation d'alternatives bas carbone et ainsi changer les comportements à long terme (Gota et al., 2018).

Pour diminuer les émissions, les villes doivent mettre en place des incitants à une diminution de l'utilisation automobile tels que des transferts modaux, des zones piétonnes, un développement des transports en commun ou encore des trajets domicile-travail plus courts (Mittal et al., 2016). Une électrification des transports aidera également à la réduction des émissions. Enfin, il sera également nécessaire de réduire les émissions liées au transport maritime, fret et à l'aviation. D'après une étude de Gota et al (2018), plus des mesures seront mises en place rapidement, moins il sera difficile d'atteindre des objectifs ambitieux.

a. Transferts modaux

Augmenter les transferts modaux en utilisant plus de transports en communs ou la mobilité douce comme les bicyclettes ou la marche à pieds pourrait aider à la diminution des émissions de gaz à effet de serre (Schaeffer et al., 2019). Le potentiel de réduction de l'automobile, y compris les transferts modaux, serait de 0,88GtCO₂ par an pour les véhicules lourds et de 2GtCO₂ par an pour les véhicules légers d'ici 2030 (ICCT, 2012). Pour aider à cette transition et arriver à des objectifs plus ambitieux, il faudrait un meilleur aménagement du territoire ou une diminution des déplacements (Newman et al., 2017 ; New Climate Economy, 2015).

Depuis plusieurs décennies, le transport de marchandises par l'air et la route a augmenté drastiquement tandis que l'on utilise moins le train ou le transport par voie navigable (Eom et al., 2012), notamment à cause du développement de l'industrie et de la déréglementation du fret qui avantage le transport routier (Sims et al., 2014). Changer les moyens de transport de marchandises pourrait également aider à la diminution de gaz à effet de serre : il s'agirait de moins transporter par camions et d'augmenter le transports en train (Schaeffer et al., 2019), ou, si l'on veut mettre en place des mesures plus ambitieuses, diminuer le transport de marchandises (Gota et al., 2018). Cependant, il est difficile de modifier les tendances, notamment à cause de la densité élevée de transport de marchandises (Rich et al., 2011). L'IEA (2009) estime que si l'on réduit le trafic mondial de marchandises transportées en camion de moitié entre 2010 et 2050, cela pourrait aboutir à une réduction d'émissions de CO₂ de 20%, dont seulement un cinquième de ces 20% serait utilisé pour l'énergie ferroviaire. L'électrification du transport ferroviaire tant pour les passagers que les marchandises est l'une des stratégies clés non seulement pour la réduction des émissions, mais également pour la réduction des coûts d'exploitation et d'entretien pour les consommateurs (Schaeffer et al., 2019). On pourrait également remplacer l'avion par le train électrique sur des trajets courts (Akerman, 2011).

Les villes seront un élément clé de la transition du secteur du transport avec l'augmentation de l'urbanisation (van de Ven et al., 2017). La collaboration du secteur privé et public est

essentielle, et des investissements seront nécessaires dans le secteur privé comme dans le secteur public (Gota et al., 2018).

b. Électrification des transports

Afin d'atteindre un objectif de 1.5°C, les véhicules particuliers devraient être complètement électriques d'ici 2050 (Lindegaard et al., 2014), et, pour atteindre l'objectif de 2°C, au moins 40% devraient l'être, soit 1 milliard de voitures (IEA, 2016b), ce qui nécessitera de nombreuses interventions politiques tels que des allègements fiscaux et des subventions (Gota et al., 2018).

Il sera également nécessaire d'étendre l'électrification aux transports publics au transport de marchandises et de passagers (en particulier les poids lourds) (Mulholland et al., 2018), et de d'étendre la mobilité partagée (Chase, 2017). De plus, la diminution des émissions permettrait de diminuer la pollution atmosphérique, en particulier dans les zones urbaines (Gota et al., 2018).

Pour que l'électrification des transports soit mis en place de manière effective, il sera également nécessaire de mettre en place une infrastructure de recharge (IEA, 2017). Celle-ci devra doit se coupler à des mesures financières telles que des taxes sur les combustibles fossiles ou des incitant pour les véhicules électriques, mais aussi à une décarbonation de la production d'électricité, puisque celle-ci augmenterait fortement (Gota et al., 2018).

c. Transport maritime, fret et aviation

L'aviation, le fret et le transport maritime contribueraient à eux seuls à 10 à 32% des émissions globales de CO₂ en 2050 (Lee et al., 2013). Cependant, il serait possible de réduire les émissions de l'aviation de 0,32GtCO₂ par an (ICCT, 2012) à 0,42GtCO₂ par an (ICAO, 2013) en 2030 si l'on remplace les combustibles actuels par des carburants alternatifs (UNEP, 2017). En ce qui concerne le transport maritime, on estime qu'il serait possible de réduire les émissions liées à celui-ci de 0,39GtCO₂ à 0,99GtCO₂ par an, principalement grâce à une meilleure efficacité énergétique

(UNEP, 2017). Cependant, la mise en place d'une politique de décarbonation pour les grands navires est difficile car elle nécessite une mobilisation internationale (Rehmatulla et Smith, 2015).

Peu de progrès ont été fait sur le remplacement des combustibles fossiles des transports maritime, de fret et d'aviation au cours des dernières années (de Coninck et al., 2018). En effet, certains carburants comme le kérosène, ne peuvent pas être substitués par de l'électricité (Nieto et al., 2018). Il n'existe que peu d'alternatives de carburants (Gota et al., 2018). Les biocarburants pourraient remplacer les combustibles actuels (Wise et al., 2017) avec les carburants de synthèse issus de l'énergie renouvelable (Schaeffer et al., 2019), mais leur potentiel de réduction d'émissions reste encore incertain (ICCT, 2012). Une autre alternative serait également possible : la technologie power-to-gas, qui consiste en une conversion de l'électricité excédentaire produite par les réseaux d'énergies renouvelables en gaz combustible (hydrogène ou méthane) (Miao et Chan, 2019).

Si les carburants tels que l'éthanol, le méthanol, le méthane, l'ammoniac et l'hydrogène font l'objet de plus en plus d'études pour remplacer les combustibles fossiles, aucune étude n'a encore démontré leur capacité à réduire les émissions pour arriver à limiter l'augmentation de température à 1.5°C (Ezeji, 2017). Hormis l'alternative de carburants, la solution serait donc une meilleure efficacité énergétique ou une nouvelle technologie à faible émissions (Gota et al., 2018).

Les mesures mises en place jusqu'à maintenant se concentrent sur la transformation technologique, mais sont loin de satisfaire les efforts requis pour un objectif de 1,5°C ou même 2°C (Gota et al., 2018). On constate également que les politiques ont délaissé les efforts vers les changements de comportements, alors qu'ils ne sont pas négligeables (IEA, 2015). Il faudrait une combinaison de changements de comportements et de mesures technologiques et une meilleure cohérence entre les différentes mesures mises en place à l'avenir si l'on veut augmenter les chances d'atteindre les objectifs. Cela laisse une grande incertitude quant au potentiel de réduction de ce secteur.

4.2.3. Industrie

L'industrie est responsable d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre globales et d'un tiers de l'énergie finale consommée dans le monde (IPCC, 2014b), ce qui représentera 19,3GtCO₂e en 2030 dans le scénario de politiques actuelles (UNEP, 2017).

Dans un scénario d'une augmentation de température de 1.5°C, il faudrait diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées à l'industrie de plus de 70% par rapport aux niveaux de 2010 (de Coninck et al., 2018). Cela signifierait des objectifs ambitieux à atteindre pour toutes les industries, comme l'augmentation du recyclage des matériaux, le développement de l'économie circulaire ou encore la diminution de la demande finale d'énergie, pouvant aller jusqu'à un tiers de diminution. La substitution de matériaux (Lewandowski, 2016 ; Urbinati et al., 2017) et l'électrification de certains processus (Ahman et al., 2016) permettraient également de réduire les émissions. De plus, le traitement, la réutilisation, le recyclage et la réduction des déchets devront être améliorés pour pouvoir réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre (Nieto et al., 2018).

La principale limite à la transition pour l'industrie est le coût de celle-ci (excepté pour l'efficacité énergétique), ce qui rend la mise en œuvre de nouvelles politiques difficiles à mettre en place à cause de problèmes de compétitivité (Ahman et al., 2016), sauf si elles sont mises en place à l'échelle internationale. Cependant, plusieurs solutions sont possibles pour réduire les émissions liées à l'industrie : l'efficacité énergétique et en matériaux, l'électrification des procédés et l'alimentation par l'hydrogène et le Carbon Capture and Storage (CCS).

a. Efficacité énergétique et en matériaux

L'efficacité énergétique permettrait une diminution des émissions de 4,1GtCO₂ par an en 2030, soit une réduction de 30% par rapport au scénario de politiques actuelles (Akbar et al., 2014). Cela nécessiterait des innovations technologiques intersectorielles telles que

l'amélioration des systèmes moteurs ou des systèmes vapeur qui ont un impact sur tous les secteurs industriels, allant des PME aux industries qui ne consomment que très peu (de Coninck et al., 2018). Les pompes à chaleur, par exemple, pourraient augmenter l'efficacité énergétique des processus industriels et réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (Forman et al., 2016). En effet, l'efficacité énergétique est essentielle pour réduire les émissions du secteur industriel, mais elle ne sera pas suffisante et doit être couplée avec d'autres politiques (Aden, 2017).

La circularité des matériaux, c'est-à-dire leur réutilisation, aura un impact positif sur les coûts, la santé et l'environnement (Ali et al., 2017). Cependant, l'avancée technologique d'un pays et la gestion de la gouvernance peuvent être des freins à la mise en place de ce genre de technologie, qui sera donc plus difficile à mettre en place dans des pays à revenu intermédiaire (de Coninck et al., 2018).

b. Électrification des procédés et alimentation par l'hydrogène

L'électrification des procédés industriels est essentielle pour réduire les émissions du secteur industriel. Cependant, elle implique de nouvelles innovations technologiques et la disponibilité d'une quantité suffisante d'électricité à prix abordable et à faible émissions (Philibert, 2017).

Une deuxième option est possible : l'alimentation en énergie par l'hydrogène. Celle-ci peut être produite par électrolyse de l'eau grâce à une électrification zéro émission, mais cela signifierait la mise en place de nouveaux réacteurs nucléaires (de Coninck et al., 2018). L'hydrogène peut également être produit par le gaz naturel. Cependant, cela ne serait productif que si on le couplait au CCS (de Coninck et al., 2018). De plus, l'utilisation de l'hydrogène dépend du développement d'un pays en matière de production d'hydrogène et d'électricité, mais aussi par la perception du public et son coût économique (Philibert, 2017).

4.2.4. Usages du sol

La valeur socio-économique des services offerts par nos ressources naturelles doit être protégée des impacts du changement climatique. En effet, les sols, les forêts et les autres écosystèmes peuvent être utilisés comme des puits de GES et ainsi contribuer à atteindre les objectifs nationaux de réduction d'émissions (Jernnas et Linner, 2019). De plus, il existe une relation importante entre la biodiversité et l'usage des terres : les pratiques de gestion des sols ont un impact important sur le maintien de la biodiversité (Haines-Young, 2009).

Si l'on veut atteindre un usage du sol durable, il faudra agir dans plusieurs domaines : l'agriculture et l'alimentation, l'usage durable du sol et la conservation des forêts et autres écosystèmes.

a. Agriculture et alimentation

Le changement de mode de consommation, la réduction du gaspillage alimentaire, ou encore une modification de la génétique des plantes pour les rendre plus résistantes aux changements climatiques sont des innovations technologiques qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre et permettraient une meilleure adaptation (de Coninck et al., 2018). Cependant, cette ambition n'est pas partagée par tous les pays. Certains pays comme le Bangladesh, le Cameroun, la Turquie ou encore le Maroc décrivent dans leur NDC une volonté de moderniser leurs systèmes agricoles sans fournir d'évaluation de l'augmentation ou de la diminution des gaz à effet de serre que cela engendrera (Nieto et al., 2018).

En effet, l'agriculture, lorsqu'elle devient un processus industriel, devient dépendante des produits pétroliers et entraîne donc une augmentation des émissions directes et indirectes (Nieto et al., 2018). Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel de modifier nos mode de consommation alimentaire en réduisant les produits de provenance animale. En effet, le bétail est la plus grande source d'émissions de gaz à effet de serre parmi les différentes sources

alimentaires, puisqu'elle représente près de 15% des émissions de gaz à effet de serre mondiales (Gerber et al., 2013). Cela comprend la production de leurs aliments, les déchets animaux, l'utilisation des terres, le transport et la transformation du bétail (de Coninck et al., 2018).

En plus de changer notre alimentation, il faudrait également réduire nos déchets alimentaires. D'après la FAO (2013), un tiers des aliments que nous produisons ne sont pas consommés (soit jetés, soit des pertes), et ce gaspillage représenterait entre 1,9GtCO₂e et 2,5GtCO₂e par an (Hiç et al., 2016). Une réduction du gaspillage alimentaire pourrait donc avoir un véritable impact sur l'atténuation. Il faut cependant que la diminution du gaspillage soit couplée avec une diminution des émissions du point de vue de la production alimentaire, et non pas qu'elle se traduise par une augmentation de la consommation (Foley et al., 2011).

Il est d'autant plus important de réduire les émissions puisque l'augmentation de température pourrait mettre en péril la sécurité alimentaire. En effet, si la température atteint une augmentation de 1.5°C, nous ne pourrions plus produire autant de nourriture dans des régions du monde où sont produites la plupart des denrées alimentaires du monde telles que l'Afrique de l'Ouest, l'Asie du Sud-Est, l'Asie du Sud ou encore l'Amérique du Nord et centrale (Schleussner et al., 2016). A partir d'une augmentation de 2°C, on pourrait voir une diminution de la production de riz, de blé et de maïs dans des régions tempérées et tropicales, mais on peut restreindre la diminution de la production en mettant en place des mesures d'adaptation ambitieuses (Challinor et al., 2014). A l'opposé, dans les hautes latitudes où la température moyenne est trop basse pour l'agriculture, l'augmentation de la concentration du CO₂ et l'augmentation de températures pourrait avoir un impact positif (de Coninck et al., 2018).

b. Usage durable du sol

Différentes méthodes permettent un usage durable du sol, non seulement grâce à une meilleure adaptation aux changements climatiques, mais également une réduction des émissions.

Si l'on veut un sol en meilleure santé, une solution possible serait l'agriculture de conservation, c'est-à-dire une gestion du sol telle que l'on perturbe le moins possible la structure du sol permettrait d'avoir un sol en meilleure santé et donc d'utiliser moins d'engrais, et cela permettrait une plus petite utilisation des machines et donc de combustibles fossiles (Pradhan et al., 2018). L'agroforesterie permet également d'améliorer la qualité du sol. Elle consiste en une intégration des arbres dans les systèmes agricoles, soit combiné avec les cultures, avec le bétail, ou avec les deux (UNEP, 2017). Elle permettrait d'améliorer la qualité du sol et de le protéger contre les phénomènes extrêmes, et pourrait même augmenter la productivité du sol mais aussi améliorer le stockage du carbone (Sida et al., 2018). Cependant, il n'existe pas encore d'études quantitatives quant à l'efficacité de l'agroforesterie en termes de sécurité alimentaire.

Pour assurer la sécurité alimentaire, l'agroécologie pourrait être une solution, puisqu'elle fournit des performances similaires à l'agriculture moderne, mais dépend beaucoup moins des impacts pétroliers et environnementaux (Seufert et al., 2012).

Enfin, l'irrigation des sols doit être un des problèmes à régler au plus vite. En effet, avec les changements climatiques, on prévoit davantage de sécheresse à certains endroits, et des précipitations importantes de courtes durée à d'autres (Elliott et al., 2014). Il faut donc mettre en place différentes stratégies selon les besoins de la localisation, ce qui demande des interventions complémentaires comme une amélioration de la conservation des sols et de l'humidité (Sikka et al., 2018). L'augmentation de l'efficacité de l'irrigation est possible d'un point de vue technique (Fishman et al., 2015), mais la région géographique est déterminante quant à la faisabilité de nouvelles technologies (de Coninck et al., 2018).

c. Forêts et autres écosystèmes

Aujourd'hui, les efforts de conservation et de restauration des écosystèmes sont encore trop peu ambitieux (Griscom et al., 2017). Pourtant, les forêts et les autres écosystèmes sont des puits de carbone et ont donc un rôle essentiel dans le combat contre le changement climatique. Leur

conservation et leur restauration est donc primordiale. Le reboisement, l'arrêt de la déforestation et les zones humides seront évoqués dans cette section, mais développés davantage dans la section 4.4.

Le reboisement pourrait aider au captage du CO₂. Cependant, cela ne serait pas compatible avec le modèle agro-alimentaire actuel ni avec l'utilisation de biocarburants puisque les terres agricoles et forestières seraient en concurrence, ce qui augmenterait le prix de l'alimentaire et des biocarburants (Nieto et al., 2018), même si des efforts à l'échelle locale pourraient aider à la réduction des coûts pour que cela soit viable d'un point de vue économique (Spencer et al., 2017).

Parallèlement au reboisement, il est primordial d'arrêter la déforestation. Cependant, l'arrêt de la déforestation inquiète certains scientifiques car cela limiterait les terrains disponibles pour l'agriculture. Cela signifierait donc une modification de nos régimes alimentaires, mais également un besoin d'efficacité et de rendement agricole et une augmentation des prix alimentaires (Kreidenweis et al., 2016).

Un autre écosystème est primordial pour la réduction des gaz à effet de serre et le maintien de la biodiversité : les zones humides. Le fonctionnement efficace des zones humides a des impacts directs et irréversibles sur l'équilibre des écosystèmes (de Coninck et al., 2018), et une augmentation de température pourrait remettre l'équilibre des zones humides en danger. Il est donc essentiel de mettre en place des stratégies de restauration et de gestion de ces zones (Finlayson et al., 2017). Les initiatives internationales qui ont été mises en place jusqu'ici n'ont pas été efficaces. Pour avoir des politiques plus efficaces, il faudrait mettre en place plus de politiques de gouvernance locales participatives, dans lesquelles toutes les parties prenantes ont un rôle (Finlayson et al., 2017). Le savoir autochtone permettrait une meilleure adaptation (Sherman et al., 2016).

4.2.5. Villes et infrastructures

Les changements climatiques auront de nombreux impacts sur les villes tels que le stress thermique, la rareté de l'eau, les nouvelles maladies ou encore la pollution de l'air (Satterthwaite et Barlett, 2017).

Aujourd'hui, les zones urbaines représentent environ la moitié de la population mondiale et 80% du PIB mondial (Seto et Dhakal, 2014), et cela ne va cesser d'augmenter. L'ONU prévoit environ 70 millions d'habitants en plus dans les villes par an d'ici 2050 (UN, 2014), principalement dans les pays à revenus intermédiaires (de Coninck et al., 2018). On estime que 60% de la population mondiale vivra dans des zones urbaines d'ici 2030 (New Climate Economy, 2014), et près des deux tiers en 2050 (UN, 2014).

Les zones urbaines représentent actuellement environ 70% de la consommation énergétique mondiale (New Climate Economy, 2014), avec des émissions qui pourraient augmenter de 226GtCO₂ d'ici 2050 à cause de l'urbanisation et du développement économique et des infrastructures (Bai et al., 2018). Les villes et les infrastructures sont donc des axes à ne pas négliger.

Il sera difficile d'atteindre l'objectif de température si l'on ne décarbonise pas les villes dans les pays développés, et que l'on ne trouve pas de solutions à faible émission pour les villes croissantes des pays en développement (Solecki et al., 2013), puisque leurs émissions convergent déjà vers celles des pays émergents (New Climate Economy, 2014). Si la gouvernance énergétique de ces derniers est renforcée, ils pourraient investir dans des énergies renouvelables aux bas prix actuels et donc offrir une énergie propre à leurs citoyens (Kennedy et al., 2018). Le GIEC (de Coninck et al., 2018) prévient donc qu'il faudra à la fois tenir compte de l'équité sociale, de l'écologie urbaine et de la participation des acteurs non étatiques et subnationaux si l'on veut un meilleur résultat de l'action climatique dans les villes.

a. Système énergétique urbain

Étant donné que les habitants des villes ont généralement un revenu plus élevé que les habitants des zones rurales, qu'ils consomment et se déplacent plus, les économies urbaines consomment plus d'énergie que l'économie globale d'un pays (Gota et al., 2018). Il faut donc modifier le système énergétique urbain. Aujourd'hui, grâce à la diminution du coût des énergies renouvelables, la possibilité de création de « villes électriques » a augmenté (Kennedy et al., 2018).

Certaines villes arrivent à réduire leur consommation énergétique grâce à l'efficacité énergétique, et réduisent leur consommation d'énergie à base de combustibles fossiles en les remplaçant par des énergies renouvelables (Eyre et al., 2018) et des « smart-grids », c'est-à-dire des réseaux qui permettent de gérer l'alimentation la consommation d'énergie grâce à l'intégration de fonctions de communication et de contrôle (Avancini et al., 2019). Ces « smart-grids » devront être gérés localement (Eyre et al., 2018).

En plus de de l'efficacité énergétique, il faudrait que les villes intègrent systématiquement des systèmes de production d'énergie renouvelable, notamment dans les bâtiments et les infrastructures des villes (Kennedy et al., 2018, UNEP, 2017).

b. Infrastructure et bâtiments

Les bâtiments sont responsables aujourd'hui près d'un tiers de la consommation d'énergie mondiale (IEA, 2016). Dans le scénario politique actuel, la consommation d'énergie des bâtiments sera de 12,6GtCO₂ d'émissions par an en 2030, dont 29% d'émissions directes telles que le chauffage et l'eau chaude et 71% d'émissions indirectes telles que les appareils électriques et l'éclairage (UNEP, 2017). Cependant, les bâtiments ont également un grand potentiel de réduction : une combinaison de réduction de la consommation d'énergie dans les matériaux de construction (New Climate Economy, 2014), une amélioration de la performance thermique et

l'utilisation directe de l'énergie des bâtiments (UNEP, 2017) réduirait les émissions de 1,9 GtCO₂e par an, allant jusqu'à une réduction de 4,9 GtCO₂e si on combine cela à un éclairage à faible consommation (UNEP, 2017).

L'efficacité énergétique des bâtiments est donc essentielle pour réduire les émissions liées à ce secteur (UNEP, 2017). Pour atteindre l'objectif de 1.5°C, il faudrait réduire les émissions liées aux bâtiments de 80 à 90% d'ici 2050 afin d'atteindre la neutralité carbone (Kuramochi et al., 2018). Les nouvelles constructions doivent être proches de la neutralité carbone d'ici 2020 dans les pays de l'OCDE (Wells et al., 2018 ; UNEP, 2017) et entre 2020 et 2025 pour les pays non membres de l'OCDE (UNEP, 2017), ce qui permettrait une réduction d'émissions de 0,68 à 0,85GtCO₂ par an en 2030 (Climate Action Tracker, 2016). De plus, les pays membres de l'OCDE doivent augmenter le taux de rénovation d'anciens bâtiments, ce qui permettrait des économies d'énergie (Kuramochi et al., 2018 ; Zangheri et al., 2018) et une diminution des émissions entre 0,52GtCO₂ et 0,93GtCO₂ par an en 2030 (Climate Action Tracker, 2016). Les taux de rénovations annuels devront être de 5% pour les pays de l'OCDE à partir de 2020 contre 3% pour les pays non membres de l'OCDE (UNEP, 2017).

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments pourrait être un défi difficile à relever pour certains pays en développement. En effet, il sera plus difficile de mettre en place des normes pour les bâtiments dans les pays en voie de développement, puisque ces normes ne sont pas toujours adaptées à leurs capacités et que la vérification de l'application des normes peut être problématique (Shapiro, 2016). De plus, ils font face à de plus grands obstacles en termes de justice et d'équité, ayant plus de citoyens pauvres qui pourraient être impactés par des nouvelles politiques d'adaptation (Chu et al., 2017).

c. Planification et infrastructure urbaine

La question de la planification urbaine est essentielle pour une réduction des gaz à effet de serre en milieu urbain. Elle touche à la fois les pays en développement comme les pays développés (New Climate Economy, 2014).

Il existe plusieurs manières de réduire les gaz à effet de serre grâce à une meilleure planification urbaine. Par exemple, on a observé une forte diminution de l'utilisation de la voiture lorsque les villes mettent en place des zones piétonnières et développent leur réseau de transport en commun, laissant moins de place à la circulation automobile (Newman et al., 2017 ; New Climate Economy, 2014). D'après un rapport de la Commission mondiale sur l'économie et le climat (Global Commission on the Economy and Climate), améliorer le réseau de transports en commun permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'environ 0,6GtCO₂eq d'ici 2030 et jusqu'à 1,8GtCO₂eq d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2015 (Lee et Erickson, 2014). En plus d'une réduction des gaz à effet de serre, la réduction de l'utilisation des voitures en milieu urbain a d'autres co-bénéfices, comme la diminution des coûts liés à la congestion du trafic et la pollution atmosphérique (Gota et al., 2018 ; Nyambuu et Semmler, 2019).

Développer un réseau de transport urbain à faible émission nécessite beaucoup de financement, mais aussi de lever des obstacles institutionnels et comportementaux (Bakker et al., 2017). D'après l'IEA, il faudra environ 50 mille milliards de dollars d'investissements dans les transports, l'efficacité énergétique, les télécommunications et les infrastructures de traitement d'eau d'ici 2030 (New Climate Economy, 2014). Seule une gouvernance forte permettra de développer ce réseau afin d'atteindre un objectif de 1.5°C (Bakker et al., 2017). La résilience des villes face aux changements climatiques peut, quant à elle, être augmentée grâce à une infrastructure urbaine verte (Culwick et Bobbins, 2016)., c'est-à-dire la plantation d'arbres de rue, les parcs, les toits et les façades vertes et des points d'eau (de Coninck et al., 2018).

d. Électrification des villes et transports

L'utilisation des véhicules électriques (voitures, vélos, transports en commun) et des chemins de fer électriques (Mittal et al., 2016) est en nette augmentation depuis quelques années (IEA, 2018). Si l'on veut atteindre un objectif de 1.5°C, il sera nécessaire de remplacer les véhicules à combustibles fossiles par des véhicules électriques (de Coninck et al., 2018). En effet, il est possible de découpler la croissance urbaine des gaz à effet de serre grâce à une réorientation des modes de transport (Newman et Kenworthy, 2015).

e. Services urbains durables dans le domaine de l'eau et de l'environnement

Une grande partie des émissions de gaz à effet de serre en milieu urbain sont dues à l'approvisionnement en eau et le traitement des eaux usées (Nair et al., 2014), et à la demande croissante en eau due à l'augmentation de la population dans les zones urbaines. L'approvisionnement en eau est coûteux et nécessite une bonne gouvernance, ce qui n'est pas toujours le cas dans des villes à faible revenus (Margerum et Robinson, 2015). Une amélioration de ces services entrainerait une diminution des émissions liées à celui-ci.

4.3. Changements dans la gouvernance

L'évolution future des émissions mondiales de gaz à effet de serre dépend des transformations qu'il est encore possible de faire au niveau sociétal pour atteindre les objectifs climatiques que nous nous sommes fixés (UNEP, 2018). Parallèlement aux actions à mettre en œuvre au niveau des différents secteurs émetteurs, il est également nécessaire d'agir de manière transversale, afin de mettre en place un cadre de gouvernance propice aux transformations requises pour atteindre les objectifs climatiques. Pour se faire, plusieurs solutions existent. Il est possible de renforcer les politiques nationales, de coordonner les gouvernances à différents niveaux, de mettre en place des mesures d'innovations technologiques, de mettre en place des politiques financières, ou encore de promouvoir des changements de comportements.

4.3.1. Renforcement des politiques nationales

Selon l'UNEP (2018), trois scénarios sont possibles : soit l'ambition du CDN du pays en matière d'atténuation est supérieur aux effets des politiques nationales mises en place, auquel cas la diminution des émissions dans le futur sera moins forte que prévue, soit le CDN du pays est peu ambitieux et les politiques nationales engendrent une diminution des émissions plus grande que prévue, soit les parties comptent sur le fait qu'ils pourront acheter des droits d'émissions pour combler l'éventuel écart entre leurs politiques nationales et leur CDN, auquel cas les émissions futures seraient supérieures aux émissions prévues dans les CDN mais seraient compensées. Dans les trois cas, ce sont les politiques intérieures qui ont le plus grand pouvoir sur les émissions futures. En effet, même si les CDN sont ambitieux, si les politiques ne suivent pas, les résultats ne suivront pas non plus. Cependant, les CDN restent primordiaux puisqu'ils représentent la volonté d'action d'un pays annoncée à la communauté internationale, et définit les engagements pour lesquels le pays sera responsable auprès de la communauté internationale (UNEP, 2018).

a. Renforcement de l'ambition

Les politiques nationales reflètent l'ambition des pays en termes d'atténuation et sont essentielles pour une diminution effective des émissions. Les politiques mises en place doivent à la fois pouvoir réduire les émissions mais également contribuer au développement national (Roelfsema et al., 2018 ; UNEP, 2018). D'après l'UNEP (2018), les pays peuvent renforcer leurs politiques nationales en élargissant le nombre de secteurs pour lesquels des politiques sont mises en place, mais aussi en renforçant l'ambition des politiques actuelles.

L'UNEP (2018) propose plusieurs manières de renforcer l'ambition des politiques nationales. D'abord, un pays peut renforcer son objectif, par exemple en élargissant le spectre des sources de gaz à effets de serre qu'il compte diminuer, ou encore en renforçant les modalités de réalisation de son objectif (via les mécanismes de marché par exemple). Cela permet de promouvoir et de soutenir des projets avec un objectif de diminution des émissions à long terme.

Ensuite, le pays pourrait définir ou renforcer d'autres objectifs comme par exemple l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'augmentation de la part d'énergies renouvelables ou la limitation de la déforestation. Ces solutions peuvent être mises en œuvre en même temps ou non, selon les besoins et les moyens de chaque pays. Certains pays auront besoin de plus de temps que d'autres pour mettre en place des mesures d'atténuation (UNEP, 2018).

b. Renforcement des actions et utilisation du potentiel technique dans les secteurs clés

Une autre solution serait d'utiliser tout le potentiel technique d'atténuation des pays (UNEP, 2018). En effet, d'après l'un des Rapport de l'UNEP sur les écarts d'émissions (2017), si le potentiel technique est réalisé au maximum (c'est-à-dire que « toutes les technologies disponibles sont pleinement déployées aux niveaux national et mondial » (UNEP, 2018)), il sera possible de résorber le « mitigation gap » d'ici 2030 pour limiter l'augmentation de température à 2°C. Trois secteurs sont à privilégier : l'énergie renouvelable provenant de l'énergie éolienne et solaire, les appareils/voitures efficaces énergétiquement et le reboisement ainsi que l'arrêt de la déforestation (UNEP, 2018).

c. Élargissement de la couverture à l'ensemble des secteurs émetteurs

Les pays membres du G20 doivent élargir leur « couverture » des politiques nationales (UNEP, 2018). En effet, certaines politiques comme le soutien aux énergies renouvelables sont appliquées dans tous les pays membres, mais d'autres politiques ne sont que très peu exploitées, comme par exemple la réduction des subventions aux combustibles fossiles ou encore la tarification du carbone pour le secteur de l'électricité (CD-LINKS, 2018). Il existe un grand potentiel d'élargissement de couverture des politiques nationales pour les pays du G20, qui, à eux seuls, émettent 78% des gaz à effet de serre mondiaux (UNEP, 2018).

4.3.2. Gouvernance à plusieurs niveaux

Pour répondre aux enjeux des changements climatiques, des actions à plusieurs niveaux et types de gouvernance sont essentiels (Romero-Lankao et al., 2018).

Dans son 5^{ème} rapport d'évaluation (RE5), le GIEC insiste sur l'importance de la gouvernance pour renforcer l'adaptation et l'atténuation (Fleurbaey et al., 2014). La gouvernance au sens large implique non seulement l'autorité politique, mais aussi d'autres acteurs, réseaux, institutions formelles et autorités (de Coninck et al., 2018). Pour renforcer l'efficacité de la gouvernance, il faut renforcer la collaboration des institutions pour qu'elles puissent non seulement interagir, mais aussi distribuer les différentes tâches en matière d'élaboration et d'application des règles, règlements et politiques mises en place (Craig et al., 2017). Cela permettrait d'y inclure l'équité, la justice, l'atténuation de la pauvreté et le développement durable (Wood et al., 2017). Certains pays ne savent pas quels acteurs impliquer dans l'élaboration de leur politique climatique, tandis que d'autres ont déjà défini les acteurs qui leur seront utiles à la transition : le secteur privé, les collectivités locales ou encore les organisations non gouvernementales (Jernnas et Linner, 2019).

Il est difficile de combiner tant de politiques, mais ces combinaisons permettent d'améliorer la confiance (Cole, 2015) et l'inclusivité et peuvent assurer la durabilité de ces politiques sur le long terme (de Coninck et al., 2018), ainsi que mettre en évidence les co-bénéfices d'une politique ambitieuse (Ziervogel et al., 2016).

a. Acteurs non étatiques et infranationaux

L'Accord de Paris incite les Parties à collaborer avec les acteurs non étatiques et infranationaux (UNEP, 2018). Lors de la COP de 2017, l'importance des acteurs non étatiques a été mise en évidence (UNEP, 2018), et pour cause : pour atteindre les objectifs, les acteurs non étatiques et infranationaux devront participer activement à la réduction d'émission (Gieseckam et al., 2018) grâce à leur travail en réseaux, dans lesquels ils pourront centraliser les engagements

climatiques individuels, ce qui pourrait faciliter l'action climatique notamment dans des économies en croissance (UNEP, 2018).

Élargir la gouvernance aux acteurs non étatiques est une tendance observée depuis maintenant plusieurs années, pour des raisons d'efficacité, de légitimité et d'équité (Bäckstrand et al., 2017). On voit d'ailleurs naître de nombreuses initiatives visant à promouvoir et soutenir les acteurs non étatiques dans l'Union européenne, mais aussi en Amérique latine et en Asie (Chan et al., 2018).

Selon l'UNEP (2018), les actions les plus importantes des acteurs non étatiques et infranationaux se présente sous la forme de leur actions individuelles (environ deux tiers) et sous forme d'actions de coopération via des initiatives de coopération internationale (environ un tiers). Les actions individuelles sont définies comme « un ensemble diversifié d'activités de gouvernance se déroulant au-delà des cadres strictement gouvernementaux et intergouvernementaux (ou multilatéraux) » (Chan et Pauw, 2014). Cependant, il existe encore des lacunes concernant les mesures prises et l'estimation des chiffres au niveau mondial, alors qu'il existe plusieurs réseaux qui relient les villes, les États et les régions en termes d'action climatique, ce qui fait que l'on sous-estime certainement l'impact qu'elles peuvent avoir (UNEP, 2018).

L'implication de tels acteurs va plus loin qu'une simple réduction d'émissions effective. Elle est cruciale car elle permet de stimuler le développement et la propagation de certaines technologies (Weischer et al., 2012) et permet l'amélioration de la communication avec le public ainsi que l'amélioration de l'éducation, c'est-à-dire qu'elle permet de renforcer la sensibilisation du public et la compréhension de toutes les parties prenantes quant aux implications d'une action climatique ambitieuse (Jernnas et Linner, 2019).

De plus, les acteurs non étatiques et infranationaux permettent un lien plus direct avec les acteurs nationaux (UNEP, 2018), de prendre des initiatives quant à la mise en place de nouvelles politiques climatiques et coordonner les actions avec les acteurs nationaux et

intergouvernementaux (Chan et al., 2018), ou encore de mettre en place de nouveaux instruments politiques qui ne peuvent être mis en place au niveau national en raison de leur coût ou de leur risque (Berstein et Hoffmann 2018). De plus, ils sont des éléments importants dans le processus décisionnel et la prise en charge des coûts de la transition énergétique. 114 parties ont annoncé dans leur CDN qu'ils seraient impliqués dans leur processus de transition bas carbone (Jernnas et Linner, 2019). Le principal défi de la gouvernance locale est de concilier les préoccupations locales et les objectifs au niveau mondial (de Coninck et al., 2018).

b. Coopération régionale et internationale

Pour qu'une politique fonctionne au-delà du niveau local, il faut mettre en place des collaborations pertinentes (Kern et Alber, 2009) tant horizontales, comme des réseaux de villes transnationaux, que verticales au sein d'une même nation (Ringel, 2017). Les collaborations sont parfois difficiles à mettre en œuvre puisque les parties prenantes n'ont pas toujours les mêmes priorités ou les mêmes préférences (Ford et al., 2016).

La coopération régionale joue un grand rôle dans la gouvernance nationale (de Coninck et al., 2018) et traite plutôt de mesures d'adaptation, tandis que les gouvernements permettent de coordonner, planifier les politiques à mettre en œuvre et de déterminer les priorités et la distribution des ressources (de Coninck et al., 2018). Généralement, les mesures d'atténuation sont traitées au niveau mondial, puisqu'il s'agit d'actions pour le bien commun mondial (Ostrom et al., 1999). Cependant, elles peuvent également jouer un rôle important dans la coopération régionale, comme par exemple les réseaux intégrés de parcs éoliens en mer du Nord (Konstantelos et al., 2017).

Les nombreuses initiatives de coopération internationale, c'est-à-dire les organisations internationales, traités et conventions, permettent de renforcer la mise en œuvre des politiques, grâce à leur vision à moyen et long terme (Oberghassel et al., 2016). D'après les initiative recensées

par la « Climate Initiatives Platform », une plateforme hébergée par l'UNEP et l'UNEP DTU Partnership, on note qu'elles ont fortement augmenté depuis les 20 dernières années, particulièrement au niveau régional, et ont même quadruplé entre 2016 et 2018 en Amérique latine et aux Caraïbes, tandis qu'elle a presque doublé en Europe, en Asie et dans le Pacifique (UNEP, 2018).

Sur les 220 initiatives recensées, 149 couvrent plusieurs secteurs, principalement les secteurs tels que l'énergie, l'industrie, le transport, l'agriculture, les villes et infrastructures ou encore l'usage des sols (UNEP, 2018). L'orientation des initiatives diffère selon les besoins des pays et de leurs capacités (UNEP, 2017). Les pays ayant un revenu faible ou intermédiaire se concentreront plutôt sur des actions dans l'agriculture (Chan et al., 2018) alors que des pays développés se concentreront plutôt sur le secteur industriel (Chan et al., 2018 ; Nieto et al., 2018). Le peu d'initiatives qui ont fourni des objectifs quantifiés (22% d'entre elles (UNEP, 2018) en termes de réduction d'émissions, de collecte de fonds ou de renforcement des capacités ont des ambitions plus élevées que les gouvernements nationaux (Graichen et al., 2017).

Il est également nécessaire de renforcer le monitoring, la communication de l'information et la vérification des données pour ces initiatives pour augmenter leur crédibilité au niveau du public et de l'État, et ainsi augmenter leur poids de décision. Cependant, cela pourrait s'avérer être un frein pour certains acteurs qui trouveraient la charge administrative trop importante (UNEP, 2018).

4.3.3. Innovation technologique

On définit les nouvelles technologies comme appartenant à un « système socio-technique » qui évolue avec le temps (Geels et Schot, 2007). On estime aujourd'hui que les nouvelles technologies pourraient avoir un impact sur les réductions d'émissions de gaz à effet de serre (OECD, 2017) grâce à l'amélioration des performances énergétiques et de la réduction des coûts (de Coninck et al., 2018). Cependant, les pays ne sont pas tous égaux face à l'innovation

technologique. En effet, les différences d'avancement technologique entre les pays sont corrélées selon leur revenu (Wei et al., 2019). Certains pays en développement doivent acheter les nouvelles technologies aux pays développés, ce qui ne bénéficie pas à leur économie, et ils craignent que cela pourrait même les conduire à une « désindustrialisation prématurée » (Rodrik, 2016).

L'innovation technologique doit être intersectorielle (UNEP, 2018) et doit être combinée avec un comportement adéquat quant à l'utilisation de ces nouvelles technologies. En effet, l'innovation pourrait amener à une transformation de la société et réduire les émissions de gaz à effet de serre (Lacroix, 2018). Cependant, les innovations coûtent cher et n'aboutissent pas forcément à une réussite. Les investisseurs doivent donc garder en tête qu'il est possible que leurs investissements n'aboutissent à rien et qu'il y a souvent de grands délais entre l'invention d'un procédé et sa commercialisation, ce qui peut les décourager (UNEP, 2018). Le secteur public a donc un rôle important à tous les stades de la chaîne d'innovation car il peut orienter les investisseurs vers des secteurs à faible intensité carbone en mettant en place des politiques ambitieuses en matière d'innovation et de recherche et développement, (UNEP, 2018).

Un des défis majeurs de cette transition est la priorité des investissements dans l'innovation (UNEP, 2018). Cependant, même si l'innovation technologique accélère de plus en plus (UNEP, 2018), elle peut aussi avoir des effets négatifs non désirés : les effets rebonds (Blake, 2005). En effet, l'amélioration de l'efficacité technologique d'un objet réduit son prix et peut stimuler la consommation même au-delà de la réduction.

Pour attirer de nouveaux investissements, des politiques coordonnées doivent être mises en place. Celles-ci doivent tenir compte de l'interdépendance des politiques mises en place: en effet, si l'efficacité de nouveaux produits est démontrée, leur financement sera d'autant plus grand, et vice-versa (UNEP, 2018). La demande des consommateurs pour des produits à faible teneur carbone joue aussi un rôle important pour la stimulation de l'innovation de produits à faible teneur en carbone (UNEP, 2018). Les réductions d'émissions liées aux nouvelles

technologies sont donc difficiles à estimer en raison des incertitudes qui persistent telles que les performances futures, les coûts futurs, l'acceptation de ces nouvelles technologies et le changement de comportement (de Coninck et al., 2018).

4.3.4. Finance

Il est urgent de mener des politiques fiscales beaucoup plus agressives. Cependant, les progrès en matière de politique fiscale sont très lents, notamment à cause de barrières politico-économiques : les coûts de ces politiques sont souvent difficiles à évaluer (UNEP, 2018).

Aujourd'hui, les politiques fiscales sont insuffisantes pour permettre une diminution efficace des émissions en ligne avec l'objectif de 2°C. Dans certains pays, on observe même encore un soutien financier à l'utilisation des combustibles fossiles (UNEP, 2018). Si l'on veut réduire les émissions de gaz à effet de serre, des politiques et des signaux de prix qui se rejoignent entre les différents secteurs doivent être mis en place, ce qui pourrait permettre de gérer également les fluctuations de prix futurs (Golub et al., 2017).

Mettre en place des politiques fiscales adéquates permet de contrôler le prix des combustibles fossiles et donc de réduire les émissions et de diriger les investissements dans le secteur de l'énergie (UNEP, 2018). Pour atteindre l'objectif de 2°C, le GIEC (2018) prévoit qu'il faudrait investir entre 1,6 et 3,8 billions de dollars par an dans les systèmes énergétiques à l'échelle mondiale, et 3 billions par an pour les transports, financement qui devra être constant pour ne pas mettre en péril des projets à long terme (UNEP, 2018).

a. Réorientation des flux financiers

Il est impératif de réorienter les investissements vers l'économie bas carbone (de Coninck et al., 2018). En effet, d'après le rapport de la New Climate Economy (2018), « la croissance à faible

émission de carbone pourrait déjà générer des bénéfices économiques de 26 milliards de dollars américains d'ici 2030 ».

Il peut être difficile pour les pays en développement de trouver des investisseurs. En effet, l'investissement dans des pays en développement n'est pas toujours privilégié parce qu'ils sont considérés comme étant des lieux d'investissement à risque, avec un risque politique et des fluctuations monétaires (Schmidt, 2014). Pour remédier à cela, certains pays ont mis en place des plateformes comprenant de nombreux projets d'investissement et qui permettent donc de réduire les coûts de transaction pour les investisseurs privés et publics (Shakya et Byrnes, 2017), et qui permettent une meilleure communication entre le secteur public et privé (Simanis, 2012).

Les recettes des politique doivent également être réorientées vers des investissements dans l'économie bas carbone. Le Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC) (2017) propose par exemple d'utiliser les revenus de la taxe carbone ou d'autres formes de financement comme les obligations vertes et de les réinvestir dans des énergies renouvelables. L'UNEP (2018) propose également plusieurs manières d'utiliser ces recettes : « le transfert en espèces, les projets d'investissement destinés à des régions ou des quartiers pauvres ou défavorisés, ou à des régions traditionnellement dépendantes de l'extraction de ressources fossiles comme le charbon, aider temporairement les industries énergivores confrontées à une forte concurrence internationale, ou encore soutenir les technologies à faible émission de carbone ou les dépenses qui améliorent la qualité de l'environnement ». Chaque pays devra décider de ses dépenses selon ses priorités politiques et sociales (UNEP, 2018).

b. Élimination des subventions aux combustibles fossiles

Il existe deux types de subventions aux combustibles fossiles : les subventions à la consommation, que l'on observe principalement dans les pays en développement et les pays producteurs de pétrole, et les subventions aux producteurs, que l'on retrouve plutôt dans les pays développés ou en développement (Bast et al., 2015).

Mêmes si elles ont baissé globalement de 15% en 2016, les subventions à la consommation continuent d'augmenter dans des pays tels que l'Angola, l'Azerbaïdjan, la Chine, le Kazakhstan, la Malaisie, le Mexique et l'Afrique du Sud (IEA, 2017). L'OCDE (2018) estime à 373 milliards de dollars les subventions pour le pétrole, le gaz naturel et le charbon en 2015 seulement.

Certaines subventions à la consommation subsistent même dans les pays développés. On cite par exemple les déductions fiscales sur les voitures de société ou encore le secteur de l'aviation, ce qui promeut des modes de transport à forte intensité carbone (UNEP, 2018). Cependant, ces subventions avantagent beaucoup plus les ménages les plus riches, qui reçoivent en moyenne 6 fois plus de subventions que les ménages les plus pauvres (Coady et al., 2015). Un arrêt des subventions à la consommation entraînerait donc plus de justice sociale, une amélioration de la qualité de l'air, de la santé publique et une meilleure efficacité économique (UNEP, 2018).

Il est essentiel d'éliminer les subventions au carbone. En effet, celles-ci peuvent annuler les effets d'une tarification du carbone. Pour le pétrole et le gaz, la meilleure solution serait de supprimer les subventions, alors qu'il faudrait plutôt augmenter la tarification pour le charbon, qui est peu affecté par les subventions (UNEP, 2018).

Les subventions à la production peuvent se trouver sous forme de politique de plafonnement et d'échange (cap and trade en anglais). Les gouvernements attribuent des crédits d'émissions gratuits aux entreprises, qu'elles peuvent acheter ou vendre à d'autres entreprises (Cao et al., 2017). Les gouvernements peuvent également mettre en place une politique de subventions à faible intensité carbonique, c'est-à-dire qu'ils mettent en place des politiques qui incitent les producteurs à produire des produits écologiques et qui augmentent si les producteurs réduisent davantage leurs émissions (Cao et al., 2017). On trouve ce type de politique aux Etats-Unis par exemple, où le gouvernement a accordé des prêts à hauteur de 2,4 milliards de dollars à des entreprises pour qu'elles puissent produire des batteries pour les véhicules électriques (Gong et

al., 2013). Ces deux politiques peuvent affecter la manière dont les entreprises fabriquent leurs produits et permettre ainsi une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

c. Tarification du carbone

Un prix faible des combustibles fossiles amène à une augmentation de leur consommation et donc des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution atmosphérique locale (UNEP, 2018). La tarification carbone via la mise en place d'une taxe ou d'un système d'échange de droits d'émissions (ou emissions trading systems, ETS) est donc essentielle pour augmenter les prix des combustibles fossiles et donc réduire leur consommation (UNEP, 2018).

On estime qu'environ 15% des émissions de gaz à effet de serre sont aujourd'hui couvertes par ces politiques, et l'on pourrait atteindre 20% si la Chine tient ses engagements en termes de politique fiscale (UNEP, 2018). Une tarification carbone compatible avec l'objectif de 2°C pourrait réduire les rentes des ressources fossiles de 40%, mais serait compensé par les recettes de l'État (Bauer et al., 2016).

Aujourd'hui, le prix du carbone n'intègre pas son coût environnemental dans de nombreux pays (Nyambuu et Semmler, 2019). En effet, les taxes d'accises ne correspondent pas toujours à la teneur en carbone correspondante, et donc à leur coût environnemental et externe tels que la pollution atmosphérique ou la congestion de trafic (Nyambuu et Semmler, 2019). A titre d'exemple, le charbon, qui est la source d'énergie la plus émettrice de gaz à effet de serre et qui cause des dommages environnementaux locaux, n'est pas ou très peu taxé dans des grands pays émetteurs (Coady et al., 2018). Si les taxes étaient plus en accord avec la teneur en carbone, l'augmentation du prix du carbone pourrait réduire la demande de combustibles fossiles (UNEP, 2018).

Pour atteindre l'objectif de 2°C, il faudrait que le prix du carbone se situe entre 24 et 68 euros par tonne de CO₂ en 2020 et entre 43 et 86 euros en 2030 (High Level Commission on Carbon Prices, 2017). Si on atteint un prix de 60 euros/tCO₂, on pourrait réduire les émissions entre 10 et 40% selon les pays (High Level Commission on Carbon Prices). Cependant, les prix restent inférieurs à ces fourchettes pour 90% des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie (UNEP, 2018).

Pour que les politiques de taxation soient efficaces, les pays doivent mettre en place une tarification carbone uniformisée pour éviter les fuites de carbone, c'est-à-dire que la production à forte intensité d'émissions se relocalisera ailleurs, ce qui annulerait l'effet de la taxe (UNEP, 2018). Pour lutter contre cela, des politiques commerciales peuvent être mises en place pour élargir la coalition des pays qui ont des objectifs climatiques ambitieux (Nordhaus, 2015).

D'un point de vue global, la tarification du carbone est mal perçue du grand public en partie parce que la communication des politiques sur la manière, les raisons et les bénéfices d'une telle tarification a été médiocre (UNEP, 2018). Klenert et al. (2018) pointent du doigt le fait qu'en plus de la tarification du carbone, de la suppression progressive des subventions, des effets sur la compétitivité et des fuites, il existe d'autres facteurs dont il faut tenir compte. On retrouve parmi eux une bonne redistribution des revenus, une meilleure confiance dans le gouvernement, une meilleure information sur les impacts, un bon timing, attribuer les tarifications aux bonnes personnes, utiliser les recettes de façon appropriée. Il faut informer le grand public des impacts positifs d'une tarification, tels qu'une amélioration de la qualité de l'air, l'amélioration de la santé publique, mais également travailler sur les modes de communication, comme le choix des mots utilisés (Baranzini et Carattini, 2017), et mettre en place des réformes progressives plutôt que soudaines et radicales (UNEP, 2018). En effet, une bonne répartition des coûts pourrait même réduire la pauvreté et les inégalités sociales par l'indemnisation des groupes les plus faibles et la diminution des coûts économiques des groupes les plus forts politiquement parlant (UNEP, 2018).

Les mesures telles que la tarification du carbone et les subventions aux autres sources d'énergie bas-carbone sont également ressenties comme une menace par des pays tels que le Qatar ou l'Arabie Saoudite, qui soulignent qu'elles pourraient avoir un impact négatif sur la croissance économique de leurs pays. Ils précisent que leurs décisions seront prises selon l'article 4.7. de la CCNUCC concernant les préoccupations des pays dépendant des combustibles fossiles (Jernnas et Linner, 2019). Ici encore, on remarque la complexité des intérêts opposés des différents pays signataires de la CCNUCC.

4.3.5. Changements de comportements

Aujourd'hui, la plupart des mesures mises en places se concentrent sur des améliorations technologiques. Cependant, les efforts d'atténuation nécessaires pour atteindre les objectifs de température sont tels que les changements de comportements seront également nécessaires pour atteindre les objectifs (van de Ven et al., 2017) et pourraient avoir un grand potentiel d'atténuation qui mérite d'être mis en évidence (Samadi et al., 2017). Le GIEC (2014c) l'exprime d'ailleurs dans son rapport, stipulant que « l'existence de limites à l'adaptation suggère que le changement transformationnel peut être une nécessité pour le développement durable dans un climat en évolution -c'est-à-dire non seulement pour s'adapter aux impacts du changement climatique, mais aussi pour modifier les systèmes et structures des relations économiques et sociales ainsi que les croyances et comportements qui contribuent au changement climatique et à la vulnérabilité sociale ».

Le revenu a une influence sur les mesures qui permettront à un individu de réduire son empreinte carbone. Par exemple, pour un ménage à revenu élevé, la diminution de ses émissions serait maximale en diminuant la consommation de produits provenant d'origine animale, en passant à des véhicules éconénergétiques et en diminuant le nombre de trajets en avion. Pour un ménage à revenu moyen dont la part du transport est moindre, c'est l'alimentation qui pèsera le plus (Lacroix, 2018). Dans son étude, Lacroix (2018) a fait une comparaison de plusieurs études et en a conclu qu'en moyenne, la part de l'alimentation dans les émissions totales d'un individu varie

entre 9 et 31%, tandis que celle du transport varie entre 19 et 32% et celle du logement entre 17 et 37%. Une réduction d'émissions de chaque individu dans ces domaines pourrait donc avoir un impact majeur à l'échelle mondiale.

a. Alimentation

Ajuster son régime alimentaire, c'est-à-dire consommer moins d'aliments d'origine animale (Jones et Kammen, 2011), permet de réduire l'empreinte carbone d'un individu. Cette réduction augmente à mesure que la consommation de ces aliments est réduite (Lacroix, 2018), ce qui permettrait une réduction des émissions de gaz à effet de serre globales jusqu'à 35 (Erb et al., 2009 ; Stehfest et al., 2009 ; Griscom et al., 2017).

Grâce à l'ajustement du régime alimentaire, les émissions de gaz à effet de serre liées aux combustibles fossiles diminuent. Cependant, elles ne représentent qu'une part marginale de cette réduction : on observe une plus grande réduction d'émissions de gaz tels que le méthane, lié à l'élevage ou encore l'oxyde d'azote, lié à l'utilisation du sol. De plus, lorsque l'on évite de déboiser pour remplacer les terres par des terres agricoles, cela crée des émissions négatives (van de Ven et al., 2017). Cependant, encore aujourd'hui, la tendance mondiale récente est à consommer de plus en plus de produits d'origine animale plutôt qu'à réduire leur consommation (Alexandratos et Bruinsma, 2012).

Les déchets alimentaires sont également une source d'émissions de gaz à effet de serre. Il est possible de diminuer ces émissions liées à l'alimentation en réduisant le nombre de déchets alimentaires. Il faudrait réduire la demande alimentaire finale, ce qui réduirait à la fois les émissions agricoles, mais aussi réduirait les émissions liées aux déchets alimentaires (van de Ven et al., 2017).

b. Mobilité

Une adaptation des modes de déplacement des individus pourrait réduire considérablement leur empreinte carbone. Il convient de noter que la mobilité varie en fonction du revenu d'un individu. D'après Isaksen et Narbel (2017), une augmentation de 1% du revenu entraînerait une augmentation de 1% des émissions liées au transport, avec une élasticité plus grande pour des modes de transport comme l'avion. Ce sont donc les ménages les plus riches qui émettent le plus en matière de mobilité.

Plusieurs changements de comportement en matière de mobilité sont possibles pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

En ce qui concerne l'utilisation de la voiture, une conduite écoénergétique est également un moyen facile de diminuer la consommation de carburant et donc de diminuer les émissions pour une même distance (Lacroix, 2018 ; van de Ven et al., 2017).

Le covoiturage pourrait également aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre. En effet, moins de voitures seraient construites, ce qui diminuerait les émissions industrielles, et cela permettrait une meilleure efficacité énergétique puisque l'on remplacerait les vieilles voitures par des voitures moins énergivores que l'on partagerait (Chen et Kockelman, 2015).

Une plus grande utilisation de la mobilité douce a également des impacts sur l'empreinte carbone d'un individu. Cependant, son utilisation devrait être promue plutôt dans les villes. En effet, l'usage du vélo, par exemple, est influencée par la distance parcourue et l'inclinaison des rues (van de Ven et al., 2017). Au-delà de 5km, son utilisation devient très marginale.

Une modification de la mobilité en termes de transport aérien sera également utile à la diminution de l'empreinte carbone d'un individu. En effet, les émissions de gaz à effet de serre liées à ce secteur sont très importantes et il est donc impératif de les réduire. Il convient toutefois

de noter que l'impact du transport aérien varie considérablement en fonction du revenu des ménages (Lacroix, 2018). Pour un ménage avec un revenu élevé, la réduction de 60% des déplacements aériens pourrait résulter en une réduction de 16,9% de son empreinte carbone totale (Jones et Kammen, 2011). En plus de la diminution de la fréquence de voyage, il faudrait également limiter la distance de voyage et prévoir des vacances plus proches (van de Ven et al, 2017). En plus de diminuer les trajets aériens, il faudrait également éviter les vols pour des trajets courts et les remplacer par des trajets en autocars, trains, TGVs ou covoiturage (van de Ven et al., 2017).

c. Facteurs qui influencent le comportement

Le comportement des individus face au changement climatique sont influencés par différents facteurs.

Tout d'abord, le revenu a un impact sur le comportement des individus (de Coninck et al., 2018). En effet, le revenu d'un individu est positivement corrélé avec les émissions de CO2 qui lui sont associées, parce qu'ils ont généralement des modes de vie qui émettent plus (Dietz et al., 2015). A l'inverse, un individu ayant un plus petit revenu émet moins, mais n'a pas forcément les moyens d'investir dans de nouvelles technologies ou dans des rénovations éconénergétiques (Andrews-Speed et Ma, 2016).

La motivation à agir dépend des valeurs et des idéologies des individus (Hornsey et al., 2016), des bénéfices qu'ils pourraient tirer de ces actions, et de si ces bénéfices s'alignent avec leur mode de pensée (Gözl et Hahnel, 2016 ; Steg, 2016). Il faut que les bénéfices que ces actions leur apporte soient supérieurs aux coûts (Wolske et al., 2017). Cependant, ce n'est pas tant la balance coûts/bénéfices qui influence les décisions, mais plutôt les habitudes (Kloeckner et al., 2003) : plus les habitudes sont fortes, moins un individu aura tendance à changer son comportement (Maréchal, 2010).

La connaissance des causes et des conséquences des changements climatiques ont également un impact sur notre comportement face à ceux-ci. Non seulement, les individus sont parfois peu informés, mais ils peuvent aussi être mal informés (Tobler et al., 2012). Les médias ont un impact considérable sur ce que les individus vont considérer comme important ou non (Ford et King, 2015). Cependant, c'est l'expérience directe d'un événement qui va avoir le plus d'influence sur notre comportement face aux changements climatiques et aux préoccupations des individus (Taylor et al., 2014), et donc renforcer notre motivation à changer nos comportements (Jabeen, 2014).

Les comportements peuvent être renforcés par les politiques mises en place, telles que des campagnes d'information, des mesures réglementaires, des incitations financières ou des changements technologiques ou d'infrastructure (Henstra, 2016). De plus, les changements de comportements vont se faire plus facilement si la politique mise en place est acceptée par le public (de Coninck et al., 2018), c'est-à-dire que les individus s'attendent à plus d'effets positifs que négatifs (Drews et Van den Bergh, 2016). Le public acceptera plus facilement une politique climatique si les coûts et bénéfices sont répartis de manière équitable (Drews et Van den Bergh, 2016).

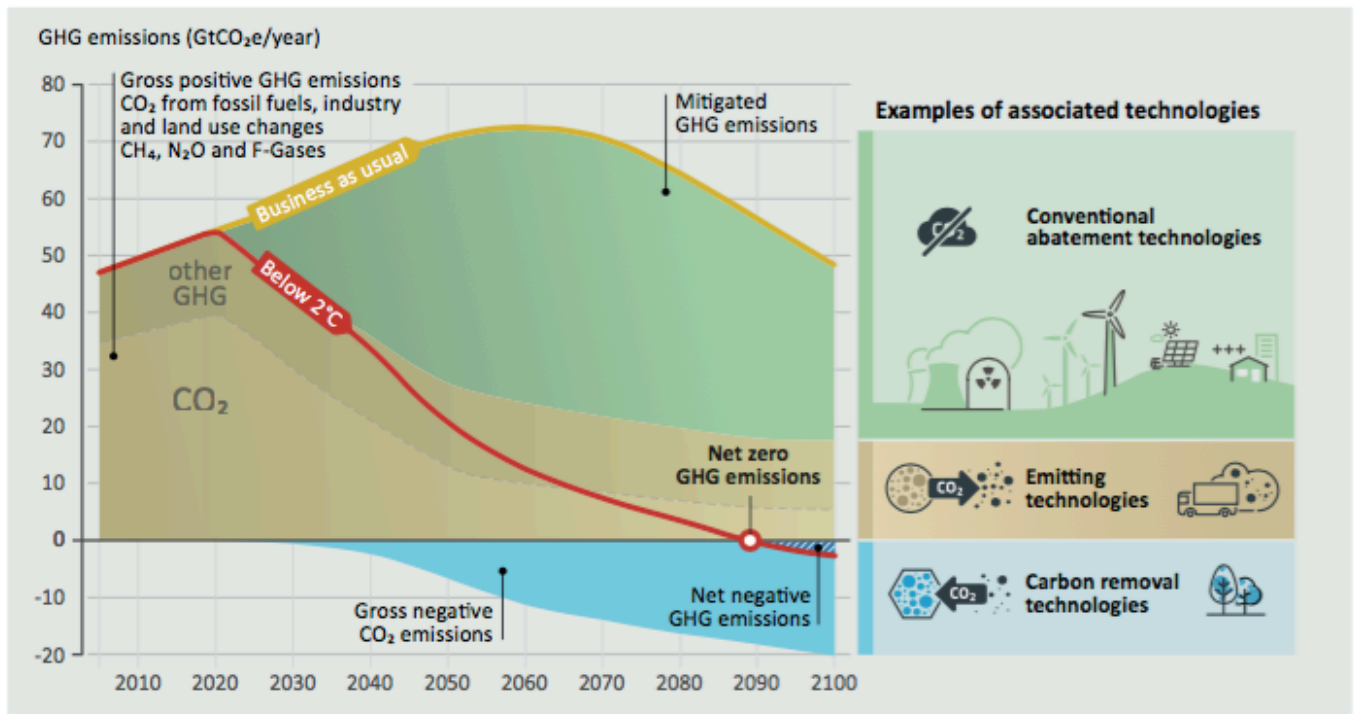
4.4. Absorption du carbone

Il sera impossible d'éliminer toutes les émissions de gaz à effet de serre dans le futur, soit parce qu'il sera trop difficile de les éviter, comme par exemple le méthane et le protoxyde d'azote dans l'agriculture, l'industrie ou d'autres secteurs (Schaeffer et al., 2019), ou parce qu'elles seraient trop coûteuses à réduire (UNEP, 2017). De plus, les émissions de gaz à effet de serre actuelles sont supérieures au budget carbone que l'on devrait respecter pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris (Rogelj et al., 2016). Pour atteindre la neutralité carbone, et, à terme, arriver à des émissions nettes négatives, il faudra extraire du carbone de l'atmosphère

(carbon dioxide removal, CDR en anglais, ou puits de carbone), ce qui consiste en une élimination et séquestration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Fig. 11) (UNEP, 2017).

Le CDR est utilisé dans de nombreux scénarios d'atténuation du changement climatique pour compenser les émissions de gaz à effet de serre excédentaires (IPCC, 2014b), même si certains scénarios prévoient qu'il est possible d'atteindre un objectif de 2°C sans CDR (UNEP, 2017). Les émissions négatives pourraient diminuer les émissions jusqu'à 8GtCO₂ (fourchette entre 5GtCO₂ et 15GtCO₂) par an en 2050, ce qui pourrait représenter une élimination médiane de 810GtCO₂ (fourchette entre 440GtCO₂ et 1020GtCO₂) en 2100 (UNEP, 2017). Il faut cependant noter que dans de nombreux scénarios, les émissions nettes négatives n'apparaissent qu'après 2050 (UNEP, 2017).

Fig. 11. Rôle de l'élimination du dioxyde de carbone dans l'atténuation du changement climatique.



Source: UNEP, 2017

Il existe deux types de puits carbone : d'une part les puits de carbone naturels, tels que le reboisement ou la séquestration du carbone au sol, et d'autre part les puits de carbone nécessitant une aide technologique.

4.4.1. Puits de carbone naturels

Afin de parvenir à éliminer le dioxyde de carbone atmosphérique, nous devons tout d'abord nous servir du potentiel d'élimination des écosystèmes terrestres (UNEP, 2017). Une bonne gestion de nos écosystèmes pourraient en outre apporter plusieurs co-bénéfices tels que l'amélioration de la qualité de l'eau, la restauration des écosystèmes, la préservation de la biodiversité, la sécurité alimentaire, ainsi que de meilleurs rendements agricoles (UNEP, 2017).

a. Boisement et reboisement

Le boisement est défini comme la plantation d'arbres sur des terres qui n'ont pas été boisées dans les 50 dernières années ou plus, tandis que le reboisement est le plantation d'arbres sur des terres qui ont été récemment boisées (moins de 50ans) (Hamilton et al., 2010).

Le potentiel d'élimination du CO₂ du boisement et reboisement serait l'une des stratégies les plus efficace dans la lutte contre les changements climatiques (Maamoun, 2019 ; Bastin et al., 2019), puisqu'il a été estimé entre 4 et 12GtCO₂ par an à l'échelle mondiale (Smith et al., 2016), allant jusqu'à 28GtCO₂ par an selon certaines études (Griscom et al., 2017). Selon Bastin et al. (2019), il serait possible de planter 0,9 milliard d'hectares supplémentaires de couvert forestier dans le monde, ce qui correspondrait à un potentiel de stockage de 205 gigatonnes supplémentaires. En plus de leur grand potentiel d'élimination de CO₂, ces méthodes sont peu coûteuses et sont utilisées depuis de nombreuses années, donc pour lesquelles on a beaucoup de connaissances (UNEP, 2017).

Le besoin de terres pour le boisement et le reboisement pourrait faire concurrence aux terres exploitées pour l'agriculture (UNEP, 2017). Une solution serait d'avoir recours à l'agroforesterie (voir point 4.2.4. a.), qui permet également d'autres co-bénéfices, ou encore à l'attribution de certaines terres spécifiquement pour le boisement et le reboisement (UNEP, 2017).

b. Zones humides

Les zones humides sont définies comme « les sols organiques intérieurs et les zones humides sur sols minéraux, les zones humides côtières, y compris les forêts de mangroves, les marais et prairies marines, et les zones humides construites pour le traitement des eaux usées » (IPCC, 2014). Le fonctionnement efficace des zones humides a des impacts directs et irréversibles sur l'équilibre des écosystèmes (de Coninck et al., 2018).

Le potentiel de séquestration des zones humides est aujourd'hui estimé entre 0,1 à 5 tonnes de carbone par hectare par an (Mitsch et al., 2012), mais il est encore difficile d'estimer leur potentiel à l'échelle mondiale à cause du manque d'information sur les volumes qu'ils occupent à l'échelle mondiale (UNEP, 2017). En plus de cela, on estime que les zones humides stockent de 44 à 71% des réserves de carbone terrestre du monde (Zedler et Kercher, 2005), CO₂ qui serait renvoyé dans l'atmosphère si ces écosystèmes étaient dégradés ou disparaissaient. La conservation de ces zones est donc essentielle. Il est cependant important de noter que les zones humides sont également une source importante d'émission de méthane, contribuant de 20 à 25% des émissions mondiales de méthane (Mitsch et al., 2012). Leur restauration pourrait donc résulter en une augmentation de températures à court terme (Mitsch et al., 2012).

c. Séquestration du carbone dans le sol

Un changement de gestion de la terre peut augmenter la teneur en carbone du sol et, par conséquent, diminuer la teneur en carbone dans l'atmosphère : c'est la séquestration du carbone

(UNEP, 2017). La séquestration du carbone peut être augmentée par différentes pratiques agricoles et de gestion des terres favorisant la fixation du carbone dans le sol (UNEP, 2017).

Le potentiel de séquestration de carbone dans le sol varie entre 1,5 et 2,6 GtCO₂e par an, pour un prix variant de 20 à 100USD par tonne de carbone (Smith, 2016). Pour les terres cultivées ou les pâturages, le prix par tonne de carbone varie entre moins 45USD et 10USD (Smith, 2016).

Cependant, la séquestration du carbone a quelques désavantages. Tout comme le boisement et le reboisement, le coût de cette pratique est faible mais nécessite un grand besoin en terres, ce qui pourrait poser problème (Smith et al., 2010). De plus, la séquestration du carbone dans le sol pourrait amener à des émissions de méthane (Smith, 2016).

d. Biochar

Le biochar est un produit agricole issu de la pyrolyse de biomasse qui peut servir de réservoir de carbone à long terme dans le sol et peut améliorer la fertilité et la qualité du sol (UNEP, 2017).

Le potentiel de réduction du CO₂ est estimé entre 1,8 et 3,3GtCO₂e par an, avec un coût entre 18USD et 166 USD par tonne d'équivalent CO₂ (Woolf et al., 2010). Si ces coûts sont relativement élevés, ils peuvent être compensés par les avantages économiques du biochar et les revenus qui en découlent (UNEP, 2017).

Le biochar est cependant une technologie qui n'est pas encore répandue à cause de ses coûts et du manque d'infrastructure technologique disponible pour le mettre en place à grande échelle (UNEP, 2017).

4.4.2. Puits de carbone technologiques

Si elles existent depuis de nombreuses années à petite échelle pour être utilisées dans les sous-marins, en médecine ou pour des applications aérospatiales (UNEP, 2017), les technologies

d'absorption du CO₂ sont au centre des discussions depuis quelques années afin d'être mises en place à grande échelle et diminuer les concentrations mondiales de carbone dans l'atmosphère.

En effet, ces technologies ne nécessitent que de très peu de terre et d'eau et leur mise en place ne sont pas très polluantes en termes d'émissions de CO₂ (UNEP, 2017). Cependant, ce sont des technologies coûteuses et leur mise en place à l'échelle mondiale n'a encore que très peu été exploitée (UNEP, 2017). Il faudrait donc un investissement massif dans ces technologies pour permettre des avancées technologiques et les mettre en place à grande échelle (McDonough, 2016). Aujourd'hui, seul le Royaume-Uni a investi dans des programmes de technologie d'élimination du carbone, alors que 23 pays s'y étaient engagés dans leur CDN (UNEP, 2017).

Le rôle des gouvernements sera crucial pour le développement de ces technologies. En effet, ils peuvent inciter l'investissement à grande échelle en fournissant des moyens financiers pour la recherche et des incitatifs pour orienter les investissements vers la recherche (Peters et Geden, 2017).

a. CCS

Le CCS (Carbon Capture and Storage) consiste en la séparation du CO₂ provenant des activités émettrices de CO₂ telles que l'industrie, l'énergie ou le transport, et de l'acheminer jusqu'à des lieux de stockage souterrains (Durmaz, 2018). L'objectif est d'éviter que le CO₂ ne soit libéré dans l'atmosphère.

Le CCS est utilisé dans de nombreux scénarios de décarbonation avancée, comme par exemple ceux décrits dans le RE5 (IPCC, 2014b) et dans le rapport spécial du GIEC (de Coninck et al., 2018), qui reposent largement sur un recours plus ou moins important au CCS, ou encore dans les projections de certains pays pour atteindre leur objectif d'émissions net zéro (Gieseckam, 2018). En effet, il pourrait permettre une diminution des émissions de 2,03GtCO₂ par an en 2030 pour les secteurs de l'énergie et de l'industrie (IEA, 2017b).

Cependant, si la technologie du captage du CO₂ s'est améliorée (Bui et al., 2018), son coût n'a pas diminué entre 2005 et 2015 (Rubin et al., 2015), ce qui ne la rend toujours pas économiquement viable (Leung et al., 2014). De plus, le coût du CCS n'est compensé par aucune autre incitation financière (IEA, 2017b), et n'est donc pas faisable à grande échelle. Cela reste donc une solution non viable d'un point de vue économique pour le moment, et il est donc important de prévoir des scénarios sans CCS.

On considère que le CCS sera plus facilement réalisable dans l'industrie que dans le secteur énergétique (de Coninck et al., 2018), même si l'on fait face aux mêmes obstacles à la réalisation. Aujourd'hui, la plupart des projets CCS qui ont déjà été mis en place sont des projets industriels (Global CCS institute, 2017) car il est possible pour certaines industries de l'utiliser sans devoir modifier leur processus de production (Leeson et al., 2017), contrairement au secteur énergétique où cela est presque inévitable (Ahman et al., 2016). Cependant, l'utilisation du dioxyde de carbone (CCU), c'est-à-dire le captage du carbone et sa réutilisation pour la fabrication de carburants, de carbonates, de polymères et de produits chimiques aura un rôle très limité dans l'industrie et donc dans la réduction d'émissions de gaz à effet de serre, non seulement parce que les technologies disponibles ne permettent pas de le réutiliser, mais également parce que l'utilisation du CO₂ en tant que combustible aboutit forcément en nouvelles émissions (Mac Dowell et al., 2017).

b. Capture directe de l'air

La capture directe de l'air consiste en la séparation du dioxyde de carbone de l'air ambiant, soit par une séparation chimique, soit par une séparation physique (Sanz-Perez et al., 2016). C'est la combinaison de la capture de l'air et du CCS qui permettra d'éliminer le carbone atmosphérique (UNEP, 2017).

Pour arriver à des émissions négatives, il faudra principalement alimenter ces technologies par des énergies renouvelables (UNEP, 2017). A l'échelle mondiale, elles pourraient permettre de réduire la concentration atmosphérique de CO₂ de 2 à 5GtCO₂ par an (USNAS, 2015). Cependant, cette technologie est toujours très coûteuse : les coûts pourraient se situer entre 200 et 600 dollars par tonne de CO₂ (UNEP, 2017). De plus, il faudrait un développement à grande échelle du CCS pour pouvoir développer la combinaison entre la capture directe de l'air et du CCS, ce qui n'est toujours pas le cas (UNEP, 2017).

4.4.3. Combinaison de puits de carbone naturels et technologiques : BECCS

Le captage et stockage du dioxyde de carbone (carbon dioxide capture and storage, CCS en anglais) combiné avec la bioénergie, que l'on appelle BECCS, permet d'éliminer le CO₂ atmosphérique en cultivant de la biomasse et en stockant le CO₂ résultant de sa combustion à des fins énergétiques dans des formations géologiques profondes (UNEP, 2017).

La disponibilité de la bioénergie est estimée à 100EJ par an (Creutzig et al., 2015), tandis qu'on estime la capacité de stockage géologique du CCS à plus de 5000GtCO₂ (UNEP, 2017). Le BECCS a un potentiel de réduction d'émissions de 0,31GtCO₂ par an en 2030 (IEA, 2017b) et permettrait, en 2050, de diminuer la concentration de CO₂ atmosphérique de 2 à 18GtCO₂ par an (Kemper, 2015).

Une fois de plus, le développement de cette technologie nécessiterait une importante mobilisation des terres, et donc une concurrence avec les terres utilisées pour l'agriculture. On estime que pour atteindre l'objectif de 2°C, il faudrait entre 0,38 et 0,7 milliard d'hectares de terres disponibles (Smith et al., 2016). De plus, cette technologie est très coûteuse : toujours pour atteindre l'objectif de 2°C, il faudrait investir 138 milliards de dollars d'ici 2050 dans le développement d'infrastructure pour la production d'électricité, et jusqu'à 124 milliards dans les infrastructures pour de développement de combustibles (Smith et al., 2016).

Cette technologie comporte d'autres inconvénients. Tout d'abord, elle nécessite de grandes quantités d'eau. On estime qu'elle nécessiterait environ 720km³ d'eau par an, soit 3% de l'eau douce utilisée pour l'Homme (Smith et al., 2016). De plus, on n'a pas encore de certitude quant à son potentiel de réduction pour les autres gaz que le dioxyde de carbone (Bright et al., 2015).

Pour l'instant, il est encore difficile de combiner la bioénergie et le CCS. En effet, si la bioénergie et le CCS sont des technologies relativement matures, l'association de ces deux technologies n'a que très peu été démontrée et a été très peu développée à grande échelle (UNEP, 2017). En effet, cette technologie est difficile à mettre en œuvre à grande échelle, notamment à cause du manque d'incitations économiques et au fait qu'il existe encore trop de réglementations quant au stockage souterrain de CO₂ (De Coninck et Benson, 2014). On ne peut donc pas encore affirmer qu'il sera possible de mettre en place une telle technologie à grande échelle de manière à pouvoir diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

4.5. Récapitulatif des combinaisons d'actions

4.5.1. Système énergétique

Pour réduire les émissions liées au système énergétique, il faudra combiner une diminution de la demande d'énergie avec une substitution de l'utilisation des combustibles fossiles par des énergies renouvelables. Cela devra se faire en passant par une électrification généralisée principalement alimentée par des énergies renouvelables, une substitution des combustibles fossiles par la bioénergie et les biocarburants ainsi que l'énergie nucléaire à court terme.

4.5.2. Transports

Le secteur du transport est l'un des secteurs les plus difficiles à décarboner parce qu'il est principalement alimenté par les combustibles fossiles (IEA, 2017). Cependant, plusieurs solutions sont possibles pour diminuer les émissions liées à ce secteur. Tout d'abord, cela peut se faire par des transferts modaux, c'est-à-dire un changement de moyen de transports pour les particuliers et le transport de marchandises, comme les transports en commun, la mobilité douce ou encore le transport ferroviaire. Ceci devra se faire conjointement avec un meilleur aménagement du territoire et une diminution des déplacements. Une deuxième solution, à mettre en place simultanément, est l'électrification des transports, qui doit être mise en place avec des infrastructures adéquates telles que le développement des infrastructures de recharge, mais également une décarbonation de la production d'électricité. Enfin, il sera possible de réduire les émissions liées au transport maritime, fret et à l'aviation en augmentant leur efficacité énergétique et en remplaçant les combustibles fossiles par des combustibles alternatifs. Des changements de comportements et de nouvelles mesures technologiques devront également être mis en place.

4.5.3. Industrie

Pour réduire les émissions liées au secteur industriel, il faudra améliorer l'efficacité énergétique des processus industriels et augmenter la circularité des matériaux. En plus de cela, une électrification des procédés industriels sera nécessaire, ce qui impliquera de nouvelles innovations technologiques et de l'électricité bon marché. L'alimentation en énergie par l'hydrogène pourrait également être une solution. L'obstacle principal à la transition du secteur industriel est le coût de cette transition.

4.5.4. Usages du sol

Une modification de l'alimentation vers réduction de la consommation de produits d'origine animale et une diminution du gaspillage alimentaire réduirait fortement les émissions. De plus, pour arriver à une transition efficace, il sera essentiel de protéger les ressources naturelles dont nous disposons. Pour garantir un usage durable des sols, plusieurs solutions sont possibles : l'agriculture de conservation, l'agroforesterie, l'agroécologie, et l'irrigation des sols qui permettra une meilleure adaptation. Le reboisement, l'arrêt de la déforestation et le fonctionnement efficace des zones humides permettraient de réduire les émissions. Cela nécessitera cependant de nombreux terrains, et pourrait entraîner une concurrence avec les terres affectées à l'agriculture.

4.5.5. Villes et infrastructures

La population des villes ne fera qu'augmenter à l'avenir. Cela implique une augmentation des émissions urbaines et la nécessité d'une adaptation aux changements climatiques dans les villes. Tout d'abord, il sera nécessaire de réduire la consommation énergétique des villes grâce à l'efficacité énergétique, une alimentation énergétique par des énergies renouvelables plutôt que par des combustibles fossiles et des « smart-grids ». Deuxièmement, les bâtiments devront être proches de la neutralité d'ici 2020 dans les pays de l'OCDE, et entre 2020 et 2025 pour les autres. Les pays signataires devront également augmenter le niveau de rénovation des bâtiments. Troisièmement, une meilleure planification urbaine et le développement d'un meilleur réseau de transport urbain sera essentielle pour réduire les émissions liées au secteur des transports dans les villes. De plus, il faudra augmenter l'utilisation des véhicules électriques et réorienter les modes de transport. Enfin, l'approvisionnement en eau et le traitement des eaux usées nécessitera une meilleure gouvernance, puisqu'il est responsable d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre du secteur urbain.

4.5.6. Renforcement des politiques nationales

Pour arriver aux objectifs de température, il faudra renforcer l'ambition et les objectifs des CDN, renforcer les actions et l'utilisation du potentiel technique dans les secteurs clés, élargir la couverture de ces politiques à tous les secteurs et trouver des politiques de compensation, comme des mécanismes de marché, pour pouvoir mettre en place les nouvelles politiques.

4.5.7. Gouvernance à plusieurs niveaux

Pour avoir une gouvernance efficace, celle-ci doit se faire à plusieurs niveaux : les acteurs non étatiques et infranationaux doivent faire partie des négociations, puisqu'ils font le lien entre les préoccupations locales et nationales et internationales. La coopération régionale et internationale est également essentielle pour mener à bien les objectifs énoncés dans les CDN. Cela permet de coordonner les politiques à mettre en place au niveau national pour qu'elles soient en adéquation avec les objectifs internationaux.

4.5.8. Innovation technologique

Les innovations technologiques permettront de réduire les gaz à effet de serre, notamment grâce à l'amélioration des performances énergétiques et la réduction des coûts. Des politiques doivent être mises en place pour diriger les investissements vers l'innovation technologique et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

4.5.9. Finance

Pour arriver à une transition efficace, il faudra avoir recours à plusieurs instruments financiers. Tout d'abord, les recettes fiscales de différents outils financiers tels que les taxes et les subventions devront être réorientés vers l'économie bas carbone. Il faudra simultanément

éliminer les subventions à la consommation et à la production des combustibles fossiles et mettre en place une tarification du carbone efficace.

4.5.10. Changements de comportements

Il est possible de réduire les émissions individuelles par divers changements de comportement : une alimentation comportant moins de produits d'origine animale, une réduction des déchets alimentaires, un changement de la manière dont l'on se déplace et une diminution des déplacements, ainsi qu'un changement dans notre manière de consommer les biens et services. Les politiques mises en place devront tenir compte de différents facteurs qui influencent le comportement des individus tels que leur revenu, leur connaissance des problèmes environnementaux et de la raison pour laquelle on met certaines politiques en place.

4.5.11. Absorption du carbone

Pour compenser les émissions qu'il ne sera pas possible d'éliminer complètement, il faudra les compenser par l'élimination du carbone. Cela peut se faire de trois manières différentes. Tout d'abord, des puits de carbones naturels comme le boisement, le reboisement, la conservation des zones humides, la séquestration du carbone dans le sol ou encore le biochar. Des puits de carbone technologiques peuvent également être mis en place, comme le CCS ou la capture directe de l'air. Enfin, une combinaison de puits de carbone naturels et technologiques pourraient aider à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

5. Conclusions

Depuis l'Accord de Paris, nous avons un objectif quantifié à atteindre en termes de température et d'émissions : limiter l'augmentation bien en-deçà de 2°C, et donc atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. On sait aujourd'hui ce que cela implique en termes de « budget carbone », et donc l'ampleur des réductions d'émissions de gaz à effet de serre nécessaires pour atteindre cette neutralité carbone. Cependant, il existe encore un grand écart entre les trajectoires d'émissions avec les politiques climatiques actuelles et celles qu'il faudrait atteindre si l'on veut limiter l'augmentation de température à 2°C, le « mitigation gap ». Il existe néanmoins des solutions pour réduire cet écart.

Si la quasi-totalité des secteurs d'activité économique sont émetteurs de gaz à effet de serre, chacun d'entre eux possède un certain potentiel de réduction, plus ou moins important selon le secteur. Cependant, pour résorber le « mitigation gap », il ne faudra pas uniquement se focaliser sur un secteur. C'est la combinaison des potentiels de réduction de tous les secteurs qui permettront une diminution des émissions assez grande pour atteindre la neutralité carbone.

Une des questions de recherche de ce mémoire était de déterminer si la neutralité carbone à l'horizon 2050 était faisable. Il ressort de ce travail qu'elle est en effet atteignable d'un point de vue technico-économique. Cependant, il existe encore un frein important à la faisabilité de la neutralité carbone : une gouvernance efficace. En effet, c'est grâce à une gouvernance efficace que des politiques climatiques ambitieuses pourront être mises en place.

Ce problème de gouvernance se reflète dans les politiques climatiques actuelles qui ne sont pas assez ambitieuses pour atteindre la neutralité carbone. De plus, certains pays n'ont pas encore de cadre politique adéquat pour mettre en place des mesures efficaces. Si l'on veut atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, il faudra donc avant tout veiller à améliorer l'efficacité politique. Pour assurer une gouvernance efficace, il faut que des cadres de gouvernance soient mis en place à tous les niveaux (local, national, régional et international). En effet, c'est

uniquement grâce à une action simultanée à tous les niveaux qu'il sera possible d'arriver aux transformations systémiques et sociétales requises pour atteindre les objectifs.

Il ressort également de ce travail que si l'on veut pouvoir mettre en œuvre les différentes solutions dans chaque secteur, il faudra de mettre à disposition les moyens financier adéquats. Il s'agira de réorienter les investissements publics et privés vers l'économie bas carbone, mais également d'éliminer les subsides aux combustibles fossiles et mettre en place une tarification carbone qui permettra de donner un signal aux agents économiques. Pour éviter les fuites de carbone dues à la mise en place de l'élimination des subsides et de la mise en place de taxes, il faudra une gouvernance harmonisée au niveau régional et mondial.

Il restera encore des émissions de gaz à effet de serre qu'il ne sera pas possible de supprimer à l'avenir. Pour compenser les émissions restantes, la plupart des scénarios 1,5°C et 2°C ont recours à des émissions négatives après 2050. Le recours à des solutions d'élimination du carbone atmosphérique (CDR) seront impératives. Cependant, elles sont encore aujourd'hui peu avancées du point de vue technologique et économique.

Limites du mémoire

Ce mémoire comporte certaines limites. En effet, il est important de garder à l'esprit qu'il est ici question de donner une vision panoramique du potentiel de réduction du « mitigation gap » en évoquant les actions principales à mettre en œuvre. L'objectif est donc de donner un aperçu concis de chaque solution et de son potentiel de réduction d'émission. Pour avoir une connaissance approfondie des différentes actions, il serait nécessaire de les développer davantage.

De plus, ce travail étant limité dans sa longueur, il était nécessaire de faire une sélection des actions présentées. Cette sélection a été faite après une comparaison des actions les plus souvent évoquées dans la littérature scientifique et celles dont le potentiel de réduction d'émissions est le plus important. Il faut donc garder à l'esprit que ce travail reprend les solutions principales pour arriver à la neutralité carbone, mais toutes les solutions possibles n'y sont pas reprises.

Enfin, il est nécessaire de garder à l'esprit que ce travail donne un aperçu du potentiel de réduction de gaz à effet de serre maximum, c'est-à-dire si les solutions technico-économiques et sociales sont utilisées dans leur plus large mesure. Cependant, comme mentionné ci-dessus, ce potentiel est sensible aux changements politiques, ainsi qu'à l'ambition des mesures mises en place et peut donc fortement varier.

Prolongement possible

Il existe aujourd'hui deux théories qui s'opposent concernant la manière d'approcher l'atténuation et atteindre les objectifs de température : le découplage et la décroissance, qui définissent des approches fondamentalement différentes.

Le découplage est défini par l'OCDE comme la rupture du lien entre croissance économique et dégradation de l'environnement (Wu et al., 2018), ou encore comme « la rupture du lien entre la croissance économique et les émissions de carbone pour promouvoir une économie mondiale à faibles émissions de carbone » (Shuai et al. 2019). Il se base sur la croyance que l'on peut continuer à croître économiquement car la lutte contre le changement climatique pourrait être compatible avec le système socio-économique actuel (Spash, 2016). La plupart des solutions décrites dans ce travail pourraient se retrouver dans cette catégorie.

La décroissance, à l'opposé, définit le fait qu'il n'est pas possible de combiner le système socio-économique actuel et la lutte contre le changement climatique. En effet, la décroissance se base sur la croyance qu'une « croissance économique indéfinie sur une planète finie est impossible » (Weiss et Cattaneo). Il ne serait pas question de réelle « décroissance » de l'économie, mais d'une diminution de la production et de la consommation, et donc des émissions de CO₂ et de la dégradation de l'environnement (Weiss et Cattaneo). Certains auteurs parlent également d'une économie sans croissance (Kallis et al., 2012).

Une prolongation de ce mémoire pourrait être de définir si une décroissance est possible à l'échelle mondiale pour pouvoir comparer les réductions d'émissions des deux concepts.

6. Bibliographie

Abbott, K.W., 2012. The transnational regime complex for climate change. *Environment and Planning C: Government and Policy* 30, 571-590.

Aden, N., 2018. Necessary but not sufficient: the role of energy efficiency in industrial sector low-carbon transformation. *Energy Efficiency* 11, 1083-1101.

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., Hemous, D., 2012. The environment and directed technical change. *Am. Econ. Rev.* 102, 131–166.

Ahman, M., Nilsson L.J., Johansson, B., 2016. Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Climate Policy* 17, 634-649.

Akbar, S., Kleiman, G., Menon, S., Segafredo, L., 2014. Climate-smart development : adding up the benefits of actions that help build prosperity, end poverty and combat climate change : Main report Washington, DC : World Bank Group. Disponible sur: <http://documents.worldbank.org/curated/en/794281468155721244/Main-report>. Consulté le 1^{er} août 2019.

Akerman, J., 2011. The role of high-speed rail in mitigating climate change - The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16, 208-217.

Akimoto, K., Sano, F., Tomoda, T., 2017. GHG emission pathways until 2030 for the 1.5 °C temperature rise target and the mitigation costs achieving the pathways. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change* 23, 839-852.

Alexandratos, N. and J. Bruinsma, 2012. *World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 Revision*. Disponible sur: <http://www.fao.org/3/ap106e/ap106e.pdf>. Consulté le 29 août 2019.

Aldy, J.E., Stavins, R.N., 2013. Designing the PostKyoto climate regime. In: *A New Global Covenant: Protection without Protectionism*. Columbia University Press, New York, 205-230.

Ali, S.H. Guirco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., Durrheim, R., Enriquez, M.A., Kinnaird, J., Littleboy, A., Meinert, L.D., Oberhänsli, R., Salem, J., Schodde, R., Schneider, G., Vidal, O., Yakovleva, N., 2017. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature* 543, 367-372.

Andrews-Speed, P. and G. Ma, 2016: Household Energy Saving in China: The Challenge of Changing Behaviour. In: *China's Energy Efficiency and Conservation: Household Behaviour, Legislation, Regional Analysis and Impacts* [Su, B., Thomson E. (Eds.)]. SpringerBriefs in Environment, Security, Development and Peace, 23-39.

Ari, I., Sari, R., 2017. Differentiation of developed and developing countries for the Paris Agreement. *Energy Strategy Reviews* 18, 175-182.

Avancini, D.B., Rodrigues, J.P.C., Martins, S.G.B., Rabêlo, R.A.L., Al-Muhtadi, J., Solic, P., 2019. Energy meters evolution in smart grids: A review. *J. Clean. Prod.* 217, 702-715.

Bäckstrand, K., Kuyper, J.W., Linnér, B.-O., Lövbrand, E., 2017. Non-state actors in global climate governance: from Copenhagen to Paris and beyond. *Env. Polit.* 26, 561-579.

Bai, X., Dawson, R. J., Ürge-Vorsatz, D., Delgado, G.C., Salisu Barau, A., Dhakal, S., Dodman, D., Leonardsen, L., Masson-Delmotte, V., Roberts, D.C., Schultz, S., 2018. Six research priorities for cities and climate change. *Nature* 555, 23-25.

Bakker, S. Dematera, K., Kappiantari, M., Anh Tuan, N., 2017. Low-Carbon Transport Policy in Four ASEAN Countries: Developments in Indonesia, the Philippines, Thailand and Vietnam. *Sustainability* 9, 1217-1233.

Baranzini, A., Carattini, S., 2017. Effectiveness, earmarking and labeling: testing the acceptability of carbon taxes with survey data. *Environ. Econ. Policy Stud.* 19, 197-227.

Bast, E., Doukas, A., Pickard, S., van der Burg, L., Whitley, S., 2015. Empty promises: G20 subsidies to oil, gas and coal production. London: Overseas Development Institute.

Bastin, J.F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C.M., Crowther, T.W., 2019. The global tree restoration potential. *Science* 365, 76-79.

Batra, R., Beladi, H., Frasca, R., 1998. Environmental pollution and world trade. *Ecol. Econ.* 27, 171-182.

Bauer, N., Mouratiadou, I., Luderer, G., Baumstark, L., Brecha, R.J., Edenhofer, O., Kriegler, E., 2016. Global fossil energy markets and climate change mitigation – an analysis with REMIND. *Clim. Change* 136, 69-82.

Baul, T.K., Alam, A., Strandman, H., Kilpelinen, A., 2017. Net climate impacts and economic profitability of forest biomass production and utilization in fossil fuel and fossil-based material substitution under alternative forest management. *Biomass and Bioenergy* 98, 291-305.

Bendito, A., Barrios, E., 2016. Convergent Agency: Encouraging Transdisciplinary Approaches for Effective Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science* 7, 430-435.

Blake, A., 2005. Jevons' paradox. *Ecol. Econ.* 54, 9-21.

Breyer, C., Bogdanov, D., Gulagi, A., Aghahosseini, A., Barbosa, L.S.N.S., Koskinen, O., Barasa, M., Caldera, U., Afanasyeva, S., Child, M., Farfan, J. and Vainikka, P., 2017. On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios. *Progress in photovoltaics: research and applications* 25, 727-745.

Bright, R. M., Zhao, K., Jackson, R.B., Cherubini, F., 2015. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Glob. Chang. Biol.* 21, 3246-3266.

Bruckner, T. et al., 2014. Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, United Kingdom and New York, NY, USA.

Bui, M. et al., 2018. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science* (in press), doi:10.1039/C7EE02342A.

Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC), 2017. Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. <https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53decccfb4c/t/5949402936e5d3af64b94bab/1497972781902/ENGLISHpEXpSUMpCarbonPricing.pdf> (Consulté le 15 juin 2019).

CD-LINKS, 2018. Climate policy database: CDlinks policy inventory. Disponible sur: http://climatepolicydatabase.org/index.php/CDlinks_policy_inventory. Consulté le 16 mai 2019.

Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., Chhetri, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4, 287-291.

Chan, S., Ellinger, P., Widerberg, O., 2018. Exploring national and regional orchestration of non-state action for a < 1.5 °C world. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 18, 135-152.

Chan, S., Pauw, P., 2014. A Global Framework for Climate Action (GFCA) - Orchestrating Non- State and Subnational Initiatives for More Effective Global Climate Governance. German Development Institute Discussion Paper (34/2014).

Chase, R., 2017. Shared mobility principles for livable cities. <https://www.sharedmobilityprinciples.org/>. Consulté le 4 juillet 2019.

Chen, T.D., Kockelman, K.M., 2015. Carsharing's life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions. *Transport Res Part D Transport and Environ* 47, 276-284.

Cheng, V.K.M, Hammond, G.P., 2017. Life-cycle energy densities and land-take requirements of various power generators: A UK perspective. *Journal of the Energy Institute* 90, 201-213.

Chu, E., Anguelovski, I., Roberts, D., 2017. Climate adaptation as strategic urbanism: assessing opportunities and uncertainties for equity and inclusive development in cities. *Cities* 60, 378-387.

Climate Action Tracker, 2016. 10 Steps: the ten most important short-term steps to limit warming to 1.5°C. Disponible sur https://climateactiontracker.org/documents/108/CAT_2016-11-16_10StepsFullReport_PolicyBrief.pdf. Consulté le 31 juillet 2019.

Coady, D., Flamini, V., Sears, L., 2015. The Unequal Benefits of Fuel Subsidies Revisited: Evidence for Developing Countries. IMF Working Paper. Washington, DC: International Monetary Fund.

Coady, D., Parry, I.W., Shang, B., 2018. Energy Price Reform: Lessons for Policymakers. *Review of Environmental Economics and Policy* 12, 197-219.

Cole, D.H., 2015: Advantages of a polycentric approach to climate change policy. *Nature Climate Change* 5, 114- 118.

Craig, R.K. et al., 2017: Balancing stability and flexibility in adaptive governance: an analysis of tools available in U.S. environmental law. *Ecology and Society* 22, Art 3.

Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faalj, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., Stromman, A., Sangwon, S., Masera, O., 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy* 7.

Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., van Vuuren, D. P., McCollum, D., et al. 2015b. Transport: a roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350, 911–912.

Creutzig F., Felix, Fernandez, Blanca, Haberl, Helmut, Khosla, Radhika, Mulugetta, Yacob, Seto, Karen C., 2016. Beyond technology: demand-side solutions for climate change mitigation. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 41, 173–198.

Culwick, C., Bobbins, K., Cartwright, A., Oelofse, G., Lander, M., Dunsmore, S., 2016. A Framework for a Green Infrastructure Planning Approach in the Gauteng City-Region, Johannesburg: Gauteng City-Region Observatory.

de Castro, C., Carpintero, Ó., Frechoso, F., Mediavilla, M., de Miguel, L.J., 2014. A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels. *Energy* 64, 506-512.

De Coninck, H., Benson, S., 2014. Carbon Dioxide Capture and Storage: Issues and Prospects. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 39, 243-70.

de Coninck, H., A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg, and T. Sugiyama, 2018: *Strengthening and Implementing the Global Response*. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Deutch, J., 2017. Decoupling economic growth and carbon emissions. *Joule* 1, 3–5.

Devogelaer, D., Duerinck, J., Gusbin, D., Marenne, Y., Nijs, W., Orsini, M., Pairon, M., 2013. Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050 : Final report. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/130419-backcasting-finalreport.pdf?ID=28161>. Consulté le 2 août 2019.

Dietz, T., Frank, K.A., Whitley, C.T., Kelly, J., Kelly, R., 2015. Political influences on greenhouse gas emissions from US states. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 112, 8254-8259.

Dong, C., Dong, X., Jiang, Q., Dong, K., Liu, G., 2018. What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters. *Science of the Total Environment* 622-623, 1294-1303.

Dong, K., Jiang, H., Sun, R., Dong, X., 2019. Driving forces and mitigation potential of global CO₂ emissions from 1980 through 2030: Evidence from countries with different income levels. *Science of the Total Environment* 649, 335-343.

Durmaz, T., 2018. The economics of CCS: Why have CCS technologies not had an international breakthrough? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 95, 328-340.

Elliott, J. et al., 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 3239-3244.

Eom J., Schipper, L., Thompson, L., 2012. We keep on truckin': Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries. *Energy Policy* 45, 327-341.

Erb, K.-H. et al., 2009: Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely - a scoping study. 1-132.

Eyre, N., Darby, S.J., Grünewald, P., McKenna, E., Ford, R., 2018. Reaching a 1.5°C target: socio-technical challenges for a rapid transition to low-carbon electricity systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376.

Ezeji, T., 2017. Production of Bio-Derived Fuels and Chemicals. *Fermentation* 3, 42.

FAO, 2013. Food waste footprint. Impacts on natural resources. Summary Report. Food waste footprint Impacts on natural resources, 63.

Figueres, C., Schellnhuber, H.J., Whiteman, G., Rockström, J., Hobley, A., Rahmstorf, S., 2017. Three years to safeguard our climate. *Nature* 546, 593-595

Finlayson, C.M. et al., 2017: Policy considerations for managing wetlands under a changing climate. *Marine and Freshwater Research* 68, 1803-1815.

Fishman, R., Devineni, N., Raman, S., 2015. Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater? *Environmental Research Letters* 10, 84022.

Fleurbaey, M. et al., 2014. Sustainable Development and Equity. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., J.C. Minx J.C. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 283- 350.

Ford, J.D., King, D., 2015. Coverage and framing of climate change adaptation in the media: A review of influential North American newspapers during 1993-2013. *Environmental Science and Policy*, 48, 137-146.

Ford, J.D. et al., 2016. Community-based adaptation research in the Canadian Arctic. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 7, 175-191.

Foley, J.A. et al., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337-342.

Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R., Meyer, B., 2016. Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57, 1568-1579.

Fransen T., Northrop E., Mogelgaard K., Levin K., 2017. Enhancing NDCs by 2020: Achieving the Goals of the Paris Agreement Working Paper. Washington, DC. World Resources Institute.

Fryer, E., 2017. Digital infrastructure: And the impacts of climate change. *Journal of the Institute of Telecommunications Professionals* 11, 8-13.

Geels, F.W., Sovacool, B.K., Schwanen, T., Sorrell, S., 2017. Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science* 357, 1242-1244.

Gerber, P.J. et al., 2013. Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities., Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Giesekam, J., Tingley, D. D., Cotton, I., 2018. Aligning carbon targets for construction with (inter)national climate change mitigation commitments. *Energy & Buildings* 165, 106-117.

Gillard, R., A. Gouldson, J. Paavola, J. Van Alstine, 2016. Transformational responses to climate change: beyond a systems perspective of social change in mitigation and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 7, 251-265.

Global CCS Institute, 2017. The Global Status of CCS 2016 Summary Report.

Golub, A., Lubowski, R., Piris-Cabezas, P., 2017. Balancing Risks from Climate Policy Uncertainties: The Role of Options and Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation. *Ecological Economics* 138, 90–98.

Gölz, S., Hahnel, U.J.J., 2016. What motivates people to use energy feedback systems ? A multiple goal approach to predict long-term usage behaviour in daily life. *Energy Research & Social Science* 21, 155-166.

Gong, X., Zhou, S.X., 2013. Optimal production planning with emissions trading. *Oper. Res.* 61, 908-924.

Göpfert, C., Wamsler, C., Lang, W., 2018. A framework for the joint institutionalization of climate change mitigation and adaptation in city administrations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24, 1-21.

Gota, S., Huizenga, C. Peet, K., Medimorec, N., Bakker, S., 2018. Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets. *Energy Efficiency* 12, 363-386.

Graichen, J., Healy, S., Siemons, A., Höhne, N., Kuramochi, T., Gonzales-Zuñiga, Sterl, S., Kersting, J., Wachsmuth, J., 2017. International Climate Initiatives – A way forward to close the emissions gap? Initiatives' potential and role under the Paris Agreement. Berlin: Öko-Institut.

Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R.T., Delgado, C., Elias, P., Hamsik, M., Kiesecker, J., Landis, E., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F.E., Sanderman, J., Silvius, M., Smith, P., Wollenberg, E., Fargione, J., 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, 11645-11650.

Haines-Young, 2009. Land use and biodiversity relationships. *Land Use Policy* 26, 178-186.

Hamilton, K., Chokkalingam, U., Bendana, M., 2010. State of forest carbon markets 2009: Taking root and branching out. Ecosystem marketplace report. Forest Trends, Washington, DC.

Havet, A. et al., 2014: Review of livestock farmer adaptations to increase forages in crop rotations in western France. *Agriculture, ecosystems & environment* 190, 120-127.

Harris, P.G., 2010. *World Ethics and Climate Change: from International to Global Justice*. Edinburg University Press, Edinburg.

Harris, Z.M., Spake, R., Taylor, G., 2015. Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. *Biomass and Bioenergy* 82, 27-39.

Heard, B.P., B.W. Brook, T.M.L. Wigley, C.J.A. Bradshaw, 2017. Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76, 1122-1133.

Hermwille, L., 2016. Climate change as a transformation challenge. A new climate policy paradigm? *GAIA-Ecol. Perspect. Sci. Soc.* 25, 19-22.

Hiç, C., Pradhan, P. Rybski, D., Kropp, J.P., 2016. Food Surplus and Its Climate Burdens. *Environmental Science and Technology* 50, 4269-4277.

Hirschberg, S. et al., 2016: Health effects of technologies for power generation: Contributions from normal operation, severe accidents and terrorist threat. *Reliability Engineering and System Safety* 145, 373-387.

Höhne, N., Kuramochi, T., Warnecke, C., Röser, F., Fekete, H., Hagemann, M., Day, T., Tewari, R., Kurdziel, M., Sterl, S., Gonzales, S., 2017. The Paris Agreement: resolving the inconsistency between global goals and national contributions. *Clim. Policy* 17, 16-32.

Hussain, A., Bui, V.-H., Kim, H.M., 2019. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy* 240, 56-72.

ICAO, 2013. Environmental Report 2013. Disponible sur <https://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013/files/assets/basic-html/index.html#2>. Consulté le 31 juillet 2019.

ICCT, 2012. Global Transportation Energy and Climate Roadmap. Disponible sur: <http://www.theicct.org/publications/global-transportation-energy-and-climate-roadmap>. Consulté le 31 juillet 2019.

IEA, 2009. Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability. International Energy Agency, Paris, France.

IEA., 2015. Energy technology perspectives 2015-mobilising innovation to accelerate climate action. Paris: IEA Publications.

IEA, 2016. World Energy Outlook 2016. IEA Publications, Paris.

IEA, 2016b. Global EV Outlook 2016. Paris: IEA Publications.

IEA, 2017. World Energy Outlook 2017. IEA Publications, Paris.

IEA, 2017b. Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations. IEA, Paris, France.

IEA, 2018. Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification. IEA, Paris, France.

IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Houghton, J. T., Jenkins, G. J., Ephraums, J. J. (eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, 1995. Climate Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/06/2nd-assessment-en.pdf>

IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2014b. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J.C. Minx (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1454.

IPCC, 2014c. Climate change 2014-impacts, adaptation and vulnerability: regional aspects. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C: summary for policymakers. Approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and Accepted by the 48th Session of the IPCC 6 October 2018.

IRENA, 2018. Global energy transformation – a roadmap to 2050.

Isaksen, E.T., Narbel, P.A., 2017. A carbon footprint proportional to expenditure - a case for Norway? *Ecol. Econ.* 131, 152-165.

Jabeen, H., 2014. Adapting the built environment : the role of gender in shaping vulnerability and resilience to climate extremes in Dhaka. *Environment & Urbanization* 26, 147-165.

Jacobson, M.Z. et al., 2017. 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*, 1, 108-121.

Jakob, M., Hilaire, J., 2015. Unburnable fossil fuel reserves. *Nature* 517, 150-152.

Jernnäs, M., Linnér, B-O., 2019. A discursive cartography of nationally determined contributions to the Paris climate agreement. *Global Environmental Change* 55, 73-83.

Jones, C.M., Kammen, D.M., 2011. Quantifying carbon footprint reduction opportunities for U.S. households and communities. *Environ. Sci. Technol.* 45, 4088-4095.

Kallis, G., Kerschner, C., Martinez-Alier, J., 2012. The economics of edgrowth. *Ecological economics* 84, 172-180.

Kemper, J., 2015. Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 40, 401-430.

Kennedy, C., Stewart, I.D., Westphal, M.I., Facchini, A., Mele, R., 2018. Keeping global climate change within 1.5°C through net negative electric cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 30, 18-25.

Kern, K. and G. Alber, 2009. Governing Climate Change in Cities: Modes of Urban Climate Governance in Multi-level Systems. In: *The international conference on Competitive Cities and Climate Change*, Milan, Italy. OECD, Paris, France, 171-196.

Kinley, R., 2017. Climate change after Paris: from turning point to transformation. *Climate Policy* 17, 9-15.

Kloeckner, C.A., Matthies, E., Hunecke, M., 2003. Operationalizing Habits and Integrating Habits in Normative Decision-Making Models. *Journal of Applied Social Psychology* 33, 396-417.

Konstantelos, I., Pudjianto, D., Strbac, G., De Decker, J., Joseph, P., Flament, A., Kreutzkamp, P., Genoese, F., Rehfeldt, L., Wallasch, A.-K., Gerdes, G., Jafar, M., Yang, Y., Tidemand, N., Janser, J., Nieuwenhout, F., van der Welle, A., Veum, K., 2017. Integrated North Sea grids: The costs, the benefits and their distribution between countries. *Energy Policy* 101, 28-41.

Koomey, J., Hultman, N.E., A. Grubler A., 2017. A reply to "Historical construction costs of global nuclear power reactors". *Energy Policy* 102, 640-643.

Kreidenweis, U. et al., 2016. Afforestation to mitigate climate change: impacts on food prices under consideration of albedo effects. *Environmental Research Letters* 11.

Kuramochi, T. et al., 2018. Ten key short-term sectoral benchmarks to limit warming to 1.5°C. *Climate Policy* 18, 287-305.

Lacroix, K., 2018. Comparing the relative mitigation potential of individual pro-environmental behaviors. *J. Clean. Prod.* 195, 1308-1407.

Lau, L.C., Lee, T.K., Mohamed, A.R., 2012. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord-A comment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 5280-5284.

Lee, D. S., Lim, L., Owen, B., 2013. Shipping and aviation emissions in the context of a 2°C emission pathway. Manchester Metropolitan University, Dalton Research Institute, Manchester, UK.

Lee, C.M., Erickson, P., 2014. What Impact Can Local Economic Development in Cities Have on Global GHG emissions? Assessing the Evidence. New Climate Economy contributing paper. Stockholm Environment Institute, Seattle, WA, US.

Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., Fennell, P.S., 2017. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 61, 71-84.

Levin, K., Rich, D., 2017. *Turning Points: Trends in Countries' Reaching Peak Greenhouse Gas Emissions over Time*. World Resource Institute.

Lewandowski, M., 2016. Designing the Business Models for Circular Economy-Towards the Conceptual Framework. *Sustainability* 8, 43.

Li, B., Li, T., Zeng, H., 2017. Analysis and predictions of historical responsibilities of carbon mitigation based on the RICE-2010 model. *Procedia computer science* 122, 362-369.

Libecap, G.D., 2014. Addressing global environmental externalities: transaction costs considerations. *J. Econ. Lit.* 52, 424-479.

Lindegaard, A., Aasrud, A., Andersen, A., Andresen, S. R., Asphjell, T., Backer, E. B., et al., 2014. *Knowledge base for low-carbon transition in Norway*. Mexico City: Norwegian Environment Agency.

Liu, X. et al., 2017. Microgrids for Enhancing the Power Grid Resilience in Extreme Conditions. *IEEE Transactions on Smart Grid* 8, 589-597.

Maamoun, N., 2019. The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success. *J. of Envi. Eco. And Management* 95, 227-256.

Mac Dowell, N., Fennell, P.S., Shah, N., Maitland, G.C., 2017. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change* 7, 243-249.

Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., Khoshnoudi, M., 2019. Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth : A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of the Total Environment* 649, 31-49.

Maréchal, K., 2010. Not irrational but habitual: The importance of "behavioural lock-in" in energy consumption. *Ecological Economics* 69, 1104-1114.

Margerum, R.D., Robinson, C.J., 2015. Collaborative partnerships and the challenges for sustainable water management. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 12, 53-58.

Martin, R., Muûls, M., de Preux, L.B., Wagner, U.J., 2014. Industry compensation under relocation risk: a firm-level analysis of the EU emissions trading scheme. *American Economic Review* 104, 2482-2508.

McDonough, W., 2016, Carbon is not the Enemy, *Nature* 539, 349-351.

McGlade, C., Ekins, P., 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature* 517, 187-190.

Mi, Z., Wei, Y., Wang, B., Meng, J., Liu, Z., Shan, Y., Liu, J., Guan, D., 2017. Socioeconomic impact assessment of China's CO₂ emissions peak prior to 2030. *J. Clean. Prod.* 142, 2227-2236.

Miao, B., Chan, S. H., 2019. The economic feasibility study of a 100-MW Power-to-Gas plant. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 20978-20986.

Millar, R.J., Fuglestedt, J.S., Friedlingstein, P., et al., 2017. Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. *Nat. Geosci.* 10, 741-747.

Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, U., Zhang, L., Anderson, C.J., Jorgensen, S.E., Brix, H., 2012. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology* 28, 583-597.

Mittal, S., Dai, H., Shukla, P.R., 2016. Low carbon urban transport scenarios for China and India: A comparative assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 44, 266-276.

Morgan, E.A., Nalau, J., Mackey, B., 2019. Assessing the alignment of national-level adaptation plans to the Paris Agreement. *Environmental Science and Policy* 93, 208-220.

Mulholland, E., Teter, J., Cazzola, P., McDonald, Z., Gallachóir, B., 2018. The long haul towards decarbonising road freight-a global assessment to 2050. *Applied Energy*, 216, 678-693.

Murray, B.C., Pizer, W.A., Reichert, C., 2017. Increasing emissions certainty under a carbon tax. NIPB 16-03. Durham, NC: Duke University. Disponible sur: <http://nicholasinstitute.duke.edu/publications>. Consulté le 15 juillet 2019

Nair, S., George, B., Malano, H.M., Arora, M., Nawarathna, B., 2014. Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. *Resources, Conservation and Recycling* 89, 1-10.

New Climate Economy, 2014. Better growth, better climate. *New climate economy: the global report*. Washington D.C., USA: The New Climate Economy.

New Climate Economy, 2018. *Unlocking the Inclusive Growth Story of the 21st Century: Accelerating Climate Action in Urgent Times*. Washington D.C., USA: The New Climate Economy.

Newman, P., Kenworthy, J., 2015. *The End of Automobile Dependence: How Cities are Moving Beyond Car-based Planning*. In: *The End of Automobile Dependence*. Island Press/Center for Resource Economics, Washington, DC, 201-226.

Newman, P., Beatley, T., Boyer, H., 2017. *Resilient Cities: Overcoming Fossil Fuel Dependence*. Island Press, Washington DC, USA.

Nieto, J., Carpintiero, O., Miguel, L. J., 2018. Less than 2°C? An economic-environmental evaluation of the Paris Agreement. *Ecological Economics* 146, 69-84.

Nordhaus, W., 2015. Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy. *American Economic Review* 105, 1339-1370.

Nyambuu, U., Semmler, W., 2019. Climate change and the transition to a low carbon economy – Carbon targets and the carbon budget. *Economic modeling*. In press.

Obergassel, W. et al., 2016. Phoenix from the Ashes - An Analysis of the Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change - Part II. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Wuppertal.

OECD, 2017. Green Investment Banks: Innovative Public Financial Institutions Scaling up Private, Low-carbon Investment. OECD Publishing, Paris.

OECD, 2017b: The Next Production Revolution : Implications for Governments and Business (Summary). OECD Publishing, Paris.

OECD, 2018. OECD Companion to the Inventory of Support Measures for Fossil Fuels 2018. Paris: OECD Publishing.

Oppenheimer, M., Petsonk, A., 2005. Article 2 of UNFCCC: Historical origins, recent interpretations. *Climatic Change* 73, 195-226.

Ostrom, E., Burger, J., Field, C.B., Norgaard, R.B., Policansky, D., 1999. Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges. *Science* 284, 278-282.

Panteli, M., Mancarella, P., 2015. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research* 127, 259-270.

Parkinson, S.C., N. Djilali, N., 2015. Robust response to hydro-climatic change in electricity generation planning. *Climatic Change* 130, 475-489.

Pedde, S., Kasper, K., Hölscher, K., Frantzeskaki, N., Holman, I., Dunford, R., Smith, A., Jäger, J., 2019. Advancing the use of scenarios to understand society's capacity to achieve the 1.5 degree target. *Global Environmental Change* 56, 75-85.

Peters, G.P., Geden, O., 2017. Catalysing a political shift from low to negative carbon. *Nat. Clim. Chang.*, 7, 619-621.

Philibert, C., 2017. Renewable Energy for Industry. From green energy to green materials and fuels. IEA, Paris, France, 72.

Popp, D., 2015. Climate friendly technological change for developing countries. In: Bernard, L., Semmler, W. (Eds.), The Oxford Handbook of the Macroeconomics of Global Warming. Oxford University Press, New York.

Pradhan, A., Chan, C., Roul, P.K., Halbrendt, J., Sipes, B., 2018: Potential of conservation agriculture (CA) for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach. *Agricultural Systems*, 163, 27-35..

Rehmatulla, N., Smith, T., 2015. Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem. *Energy Policy* 84, 44-57.

REN21, 2017. Global Status Report. Disponible sur <http://www.ren21.net/gsr-2017/>. Consulté le 28 juillet 2019.

Rich J., Kveiborg, O., Hansen, C.O., 2011. On structural inelasticity of modal substitution in freight transport. *Journal of Transport Geography* 19, 134-146.

Ringel, M., 2017. Energy efficiency policy governance in a multi-level administration structure - evidence from Germany. *Energy Efficiency* 10, 753-776.

Rocha, M., Krapp, M., Guetschow, J., Jeffery, L., Hare, B., Schaeffer, M., 2015. Historical responsibility for climate change – from countries emissions to contribution to temperature increase. Climate analytics and Postdam Institute for Climate Impact Research.

Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Schellnhuber, H.J., 2017. A roadmap for rapid decarbonization. *Science* 355, 1269–1271.

Roelfsema, M., Fekete, H., Höhne, N., den Elzen, M., Forsell, N., Kuramochi, T., de Coninck, H. and van Vuuren, D.P., 2018. Reducing global GHG emissions by replicating successful sector examples: the 'good practice policies' scenario. *Clim. Policy*.

Rogelj, J., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Kriegler, E., Schaeffer, M., Krey, V., & Riahi, K. 2015. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5°C. *Nature Climate Change* 5, 519–527.

Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature* 534, 631-639.

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., van Vuuren, D., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Tavoni, M., 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C. *Nature Climate Change* 8, 325-332.

Romero-Lankao, P., Hughes, S., Rosas-Huerta, A., Borquez, R., Gnatz, D.M., 2013. Institutional capacity for climate change responses: An examination of construction and pathways in Mexico City and Santiago. *Environment and Planning C: Government and Policy* 3, 785-805.

Rubin, E.S., Davison, J.E., Herzog, H.J., 2015. The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, 378-400.

Samadi, S., Gröne, M.C., Schneidewind, U., Luhmann, H.J., Venjakob, J., Best, B., 2017. Sufficiency in energy scenario studies: taking the potential benefits of lifestyle changes into account. *Technological Forecasting and Social Change* 124, 126-134.

Sanz-Perez, E.S., Murdock, C.R., Didas, S.A., Jones, C.W., 2016. Direct Air Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem. Rev.* 116, 11840-11876.

Satterthwaite, D., Bartlett, S., 2017. Editorial: The full spectrum of risk in urban centres: changing perceptions, changing priorities. *Environment and Urbanization* 29, 3-14.

Schaeffer, M., Fuentes Hultiler, U., Brecha, R., Fyson, C., Hare, B., 2019. Insights from the IPCC Special Report on 1.5°C for preparation of long-term strategies. Climate Analytics. Berlin, Germany.

Schleussner, C.–F. et al., 2016. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2°C. *Earth System Dynamics* 7, 327-351.

Seto, K.C., Dhakal, S., 2014. Chapter 12: Human Settlements, Infrastructure, and Spatial Planning. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. O. Edenhofer, R. Pichs- Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York.

Seufert, V., Ramankutty, N., Foley, J., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485, 229–232.

Schmidt, T.S., 2014. Low-carbon investment risks and de-risking. *Nature Climate Change*, 4, 237.

Shakya, C. and Byrnes, R., 2017. Turning up the volume: Financial aggregation for off-grid energy. IIED Issue Paper, IIED, London.

Shapiro, S., 2016. The realpolitik of building codes: overcoming practical limitations to climate resilience. *Building Research & Information* 44, 490-506.

Shuai, C., Chen, X., Wu, Y., Zhang, Y., Tan, Y., 2019. A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidences from 133 countries. *Science of the Total Environment* 646, 524-543.

Sherman, M., Ford, J., Llanos-Cuentas, A., Valdivia, M.J., 2016. Food system vulnerability amidst the extreme 2010- -2011 flooding in the Peruvian Amazon: a case study from the Ucayali region. *Food Security* 8, 551-570.

Sida, T.S., Baudron, F., Kim, H., Giller, K.E., 2018. Climate-smart agroforestry: *Faidherbia albida* trees buffer wheat against climatic extremes in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Agricultural and Forest Meteorology* 248, 339-347.

Sikka, A.K., Islam, A., Rao, K.V., 2018. Climate-Smart Land and Water Management for Sustainable Agriculture. *Irrigation and Drainage* 67, 72-81.

Simanis, E., 2012. Reality check at the bottom of the pyramid. *Harvard Business Review* June 2012. Disponible sur: [https:// hbr.org/2012/06/reality-check-at-the-bottom-of-the-pyramid](https://hbr.org/2012/06/reality-check-at-the-bottom-of-the-pyramid). Consulté le 15 juin 2019.

Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014. Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Smith, P., 2016. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology* 22, 1315-1324.

Smith, P., Gregory, P., van Vuuren, D. et al., 2010. Competition for land. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365, 2941-2957.

Smith, P., Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R.B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D.P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J.G., McCollum, D., Peters, G.,

Andrew, R., Krey, V., Shrestha, G., Friendlingstein, P., Gasser, T., Grübler, A., Heidug, W.K., ..., Yongsung, C., 2016. Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nature Climate Change* 6, 42-50.

Solecki, W. et al., 2018. City transformations in a 1.5 °C warmer world. *Nature Climate Change*, 8, 177-181.

Spash, C., 2016. The political economy of Paris Agreement on human induced climate change: a brief guide. *Real World Econ. Rev.* 75, 67–75.

Spencer, B. et al., 2017. Case studies in co-benefits approaches to climate change mitigation and adaptation. *Journal of Environmental Planning and Management* 60, 647-667.

Steg, L., 2016. Values, Norms, and Intrinsic Motivation to Act Proenvironmentally. *Annual Review of Environment and Resources* 41, 277-292.

Stehfest, E., Bouwman, L., van Vuuren, D., den Elzen, M., Eickhout, B., Kabat, P., 2009. Climate benefits of changing diet. *Clim. Chang.* 95, 83-102.

Taylor, A.L., Dessai, S., Bruine de Bruin, W., 2014. Public perception of climate risk and adaptation in the UK: A review of the literature. *Climate Risk Management* 4-5, 1-16.

Teske, S., Sawyer, S., Schäter, O., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., 2015. *Energy [R]evolution a Sustainable World Energy Outlook 2015*. Hamburg: Greenpeace International.

Thorgeirsson, H., 2015. Paris and the Path to Climate Neutrality. Arctic Frontiers Conference on Climate and Energy. High North Research Centre for Climate and the Environment, Tromso, Norway.

Thornton, P.K. et al., 2018. A Qualitative Evaluation of CSA Options in Mixed Crop-Livestock Systems in Developing Countries. In: *Climate Smart Agriculture : Building Resilience to Climate Change* [Lipper, L., N. McCarthy, D. Zilberman, S. Asfaw, and G. Branca (Eds.)]. Springer International Publishing, Cham, 385-423.

Tobler, C., Visschers, V.H.M., Siegrist, M., 2012. Consumers' knowledge about climate change. *Climatic Change* 114, 189-209.

UN, 2014. World urbanisation prospects, 2014 revisions. Department of Economic and Social Affairs, New York, NY, USA.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2017. Emissions Gap Report 2017. Disponible sur: <https://unenvironment.org/emissionsgap>. Consulté le 5 mai 2019.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2018. Emissions gap report 2018. Disponible sur: <https://unenvironment.org/emissionsgap>. Consulté le 3 avril 2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 1992. United Nations Framework Convention.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2015. Adoption of the Paris Agreement. Disponible sur: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>, consulté le 14 avril 2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2015b. The Paris Agreement, Conference of the Parties. Disponible sur: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf, consulté le 12 avril 2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2017. Draft decision 1/CP.23. Preparations for the implementation of the Paris Agreement and the first session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement. Disponible sur: <https://unfccc.int/resource/docs/2017/cop23/eng/l13.pdf>. Consulté le 17 juin 2019.

Urbinati, A., Chiaroni, D., Chiesa, V., 2017. Towards a new taxonomy of circular economy business models. *J. Clean. Prod.* 168, 487-498.

USNAS, 2015. Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. US National Academy of Sciences, Washington D.C.

van de Ven, D.J., Gonzalez-Eguino, M., Arto, I., 2017. The potential of behavioural change for climate change mitigation: a case study for the European Union. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 23, 853-886.

van Vliet, M.T.H., Wiberg, D., Leduc, S., Riahi, K., 2016: Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6, 375-380.

Vergara, W., Rios, A.R., Galindo, L.M., Samaniego, J., 2015. Physical Damages Associated with Climate Change Impacts and the Need for Adaptation Actions in Latin America and the Caribbean. In: *Handbook of Climate Change Adaptation* [Leal Filho, W. (ed.)]. Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, Berlin and Heidelberg Germany, 479-491.

Wang, H., Chen, W., 2019. Gaps between pre-2020 climate policies with NDC goals and long-term mitigation targets: analyses on major regions. *Energy Procedia* 158, 3664-3669.

Wei, Y., Li, Y., Wu, M., Li, Y., 2019. The decomposition of total-factor CO₂ emission efficiency of 97 contracting countries in Paris Agreement. *Energy Economics* 78, 365-378.

Weischer L., Morgan J., Patel M., 2012. Climate clubs: can small groups of countries make a big difference in addressing climate change? *Review of European Community & International Environmental Law* 21, 177-192.

Weiss, M., Cattaneo, C., 2017. Degrowth – Taking stock and reviewing an emerging academic paradigm. *Ecological Economics* 137, 220-230.

Wells, L., Rismanchi, B., Aye, L., 2018. A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context. *Energy and Buildings* 158, 616-628.

Westley, F., Olsson, P., Folke, C., Homer-Dixon, T., Vredenburg, H., Loorbach, D., Thompson, J., Nilsson, M., Lambin, E., Sendzimir, J., 2011. Tipping toward sustainability: emerging pathways of transformation. *J. Hum. Environ.* 40, 762–780.

Wigley, T. M. L., Richels, R., Edmonds, J. A., 1996. Economic and environmental choices in the stabilization of CO₂ concentrations: Choosing the “Right” emissions pathway, *Nature* 379, 240-243.

Wise, M., Muratori, M., Kyle, P., 2017. Biojet fuels and emissions mitigation in aviation: An integrated assessment Approval Session Chapter 4 IPCC SR1.5 modeling analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52, 244-253.

Wolske, K.S., Stern, P.C., Dietz, T., 2017. Explaining interest in adopting residential solar photovoltaic systems in the United States: Toward an integration of behavioral theories. *Energy Research & Social Science* 25, 134-151.

Wood, B.T., Quinn, C.H., Stringer, L.C., Dougill, A.J., 2017. Investigating Climate Compatible Development Outcomes and their Implications for Distributive Justice: Evidence from Malawi. *Environmental Management* 1, 1-18.

Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, A., Lehmann, J., Joseph, S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1, Article 56.

Wu, Y., Chau, K.W., Lu, W., Shen, L., Shuai, C., Chen, J., 2018. Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry. *Environ. Impact Assess. Rev.* 71, 60-69.

WWF, Ecofys, 2011. The energy report: 100% renewable energy by 2050.

Zangheri, P., Armani, R., Pietrobon, M., Pagliano, L., 2018. Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe. *Energy Efficiency* 11, 337-369.

Zedler, J.B., Kercher, S., 2005. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 30, 39-74.

Ziervogel, G., Cowen, A., Ziniades, J., 2016. Moving from Adaptive to Transformative Capacity: Building Foundations for Inclusive, Thriving, and Regenerative Urban Settlements. *Sustainability*, 8, 955.

7. Annexes

Annexe 1. Part des 12 plus grands émetteurs dans la totalité des émissions

Country	Share of total emissions
China	23.9%
U.S.A.	12.1%
EU-28	9.0%
India	5.7%
Brazil	5.7%
Russian Fed.	5.3%
Japan	2.8%
Canada	2.0%
Congo, DR	1.5%
Indonesia	1.5%
Australia	1.5%
Korean Rep.	1.3%
Total	72.2%

Source: Nieto et al., 2018

Annexe 2. Pays classés par groupe selon leur revenu.

Income group	Countries
Low income	Afganistan, Benin, Burkina Faso, Burundi, Cambodia, Central African Rep., Chad, Comores, DR of Congo, Eritrea, Ethiopia, Gambia, Guinea, Guinea Bissau, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mozambique, Nepal, Niger, Rwanda, Sierra Leone, Somalia, South Sudan, Tanzania, Togo, Uganda, Zimbabwe.
Lower-Middle	Armenia, Bangladesh, Bhutan, Bolivia, Cameroon, Cape Verde, Congo, Djibouti, Egypt, El Salvador, Georgia, Ghana, Guayana, India, Indonesia, Ivory Coast, Kenya, Kiribati, Lao, Lesotho, Mauritania, Morocco, Myanmar, Nigeria, Papua New Guinea, Samoa, Senegal, Solomon Islands, Sri Lanka, St. Tome, Sudan, Tajikistan, Vanuatu, Vietnam, Yemen, Zambia.
Upper-Middle	Algeria, Angola, Azerbaijan, Belarus, Belize, Bosnia-Herzegovina, Brazil, China, Costa Rica, Cuba, Dominica, Ecuador, Fiji, Gabon, Grenada, Jamaica, Jordan, Kazajstan, Lebanon, Marshall Islands, Mauritius, Mongolia, Namibia, Palau, Paraguay, South Africa, St Kitts, St Lucia, Surinam, Thailand, Tonga, Tunes, Turkey, Tuvalu.
High	Antigua and Barbuda, Argentina, Bahamas, Barbados, Brunei, Equatorial Guinea, Monaco, Oman, Qatar, San Marino, Saudi Arabia, Seychelles, St. Vincent & Grenadines, U.A.E., Uruguay, Venezuela.
OECD	Australia, Canada, Chile, EU28, Iceland, Israel, Japan, Korean Rep., New Zealand, Norway, Switzerland, USA.

Source : Nieto et al., 2018

Annexe 3. Vue d'ensemble du statut des membres du G20, y compris les engagements pris à Cancun et les objectifs des CDN.

Country	Share of global GHG emissions in 2017 ^a	On track to meet the targets with current policies?		Unconditional NDC: per capita ^b GHG emissions		Emission peaking	
		Cancun pledges	Unconditional NDC	tCO ₂ e/cap in 2030 ^c	versus 2015 levels	Peaking year ^d	Average annual growth after peaking ^e
Argentina	0.8%	No pledge	No	9.8	-6%	No commitment to peak	---
Australia	1.2%	Yes	No	15.4	-29%	2006	-1.6%/year
Brazil	2.3%	Yes	Yes	5.3	-22%	2004	(2006–2016) -12.0%/year (2004–2012) +2.4%/year excluding LULUCF)
Canada	1.6%	No	No	12.9	-33%	2007	-0.6%/year (2007–2016)
China	26.8%	Yes	Yes	10.0	+17%	By 2030 (CO ₂ only)	---
EU28	9.0%	Yes	No	6.1	-23%	1990 or earlier	-1.1%/year (1990–2016)
India	7.0%	Yes	Yes*	3.5	+67%	No commitment to peak	---
Indonesia	1.7%	Uncertain	Uncertain	6.9	+15%	No commitment to peak	---
Japan	3.0%	Yes	Yes	8.6	-13%	By 2020	---
Mexico	1.5%	Uncertain	Uncertain	5.1	-2%	By 2030	---
Republic of Korea	1.6%	No	No	10.1	-21%	By 2020	---
Russian Federation	4.6%	Yes	Yes*	18.9	+33%	1990 or earlier (former Soviet republic)	-2.5%/year (1990–2016) +0.5%/year (2000–2016)
Saudi Arabia	1.5%	No pledge	No	23.1	+19%	No commitment to peak	---
South Africa	1.1%	Uncertain	No	9.5	0%	No commitment to peak	---
Turkey	1.2%	No pledge	Yes*	10.5	+102%	No commitment to peak	---
United States of America	13.1%	Uncertain	No	14.0 (2025)	-25% (2025)	2007	-1.5%/year (2007–2016)

Notes:

a Olivier et al. (2018), excluding LULUCF.

b Population projections are based on the medium fertility variant of the United Nations World Population Prospects 2017 edition (UN DESA, 2017).

c The G20 average in 2015 was 7.5 tCO₂e/cap (based on national GHG inventories and using the EDGAR GHG trend if emissions for the latest years were missing). Using EDGAR estimates only, the G20 average in 2015 was 8.0 tCO₂e/cap (Olivier et al., 2017).

d Given the unconditional pledges. Expected peak years are based only on commitments that countries have made and assume the achievement of such commitments.

e Authors' calculations based on UNFCCC (2018) data (including LULUCF). For Australia and Canada, the peak years based on 2018 GHG inventories were 2007 and 2004 respectively, which differs from those assessed by Levin and Rich (2017), since they used older inventory data. Peak years reported by Levin and Rich (2017) are used here for the calculations. The average emission growth rates were -1.8 percent/year for Australia with 2007 as the peak year and -0.5 percent/year for Canada with 2004 as the peak year.

* Denotes that the current policy trajectory is more than 10 percent below the NDC target.

Source : UNEP, 2018

Annexe 4. Émissions de gaz à effet de serre globales en 2030 sous différents scénarios (médian et amplitude du 10^{ème} au 90^{ème} percentile), implications de températures et l'écart d'émissions qui en résulte.

Scenario (rounded to the nearest gigatonne)	Number of scenarios in set	Global total emissions in 2030 [GtCO ₂ e]	Estimated temperature outcomes			Emissions Gap in 2030 [GtCO ₂ e]		
			50% chance	66% chance	90% chance	Below 2°C	Below 1.8°C	Below 1.5°C in 2100
No-policy baseline	179	65 (60–70)						
Current policy	4	59 (56–60)				18 (16–20)	24 (22–25)	35 (32–36)
Unconditional NDCs	12	56 (52–58)				15 (12–17)	21 (17–23)	32 (28–34)
Conditional NDCs	10	53 (49–55)				13 (9–15)	19 (15–20)	29 (26–31)
Below 2.0°C (66% chance)	29	40 (38–45)	Peak: 1.7–1.8°C In 2100: 1.6–1.7°C	Peak: 1.9–2.0°C In 2100: 1.8–1.9°C	Peak: 2.4–2.6°C In 2100: 2.3–2.5°C			
Below 1.8°C (66% chance)	43	34 (30–40)	Peak: 1.6–1.7°C In 2100: 1.3–1.6°C	Peak: 1.7–1.8°C In 2100: 1.5–1.7°C	Peak: 2.1–2.3°C In 2100: 1.9–2.2°C			
Below 1.5°C in 2100 (66% chance)	13	24 (22–30)	Peak: 1.5–1.6°C In 2100: 1.2–1.3°C	Peak: 1.6–1.7°C In 2100: 1.4–1.5°C	Peak: 2.0–2.1°C In 2100: 1.8–1.9°C			

Note: The gap numbers and ranges are calculated based on the original numbers (without rounding), which may differ from the rounded numbers (3rd column) in the table. Numbers are rounded to full GtCO₂e. GHG emissions have been aggregated with 100-year global warming potential values of the IPCC 2nd Assessment Report. The NDC and current policy emission projections may differ slightly from the presented numbers in Cross-Chapter box 11 of the IPCC Special Report (Bertoldi et al., 2018) due to the inclusion of new studies after the literature cut-off date set by the IPCC. Pathways were grouped in three categories depending on whether their maximum cumulative CO₂ emissions were less than 600 GtCO₂, between 600 and 900 GtCO₂, or between 900 and 1,300 GtCO₂ from 2018 onwards until net zero CO₂ emissions are reached, or until the end of the century if net zero is not reached before. Pathways assume limited action until 2020 and cost-optimal mitigation thereafter. Estimated temperature outcomes are based on the method used in the IPCC 5th Assessment Report.

Source : UNEP, 2018

Annexe 5. Vue d'ensemble des potentiels de réduction d'émission par secteur.

Sector	Category	Emission reduction potential in 2030 (GtCO ₂ e)	Category	Sectoral aggregate potential (GtCO ₂ e)
Agriculture	Cropland management	0.74	Basic	3 (2.3 - 3.7)
	Rice management	0.18		
	Livestock management	0.23		
	Grazing land management	0.75		
	Restoration of degraded agricultural land	0.5 - 1.7		
	Peatland degradation and peat fires	1.6	Additional	3.7 (2.6 - 4.8)
	Biochar	0.2		
	Shifting dietary patterns	0.37 - 1.37		
	Decreasing food loss and waste	0.97 - 2		
Buildings	New buildings	0.68 - 0.85	Basic	1.9 (1.6 - 2.1)
	Existing buildings	0.52 - 0.93		
	Renewable heat - bio	0.39		
	Renewable heat - solar	0.21		
	Lighting	0.67	Basic (indirect emissions)	See energy sector potential
	Appliances	3.3		
Energy sector	Solar energy	3 - 6	Basic	10.0 (9.3 - 10.6)
	Wind energy	2.6 - 4.1		
	Hydropower	0.32		
	Nuclear energy	0.87		
	Bioenergy	0.85		
	Geothermal	0.73		
	CCS	0.53		
	Bioenergy with CCS	0.31		
	Methane from coal	0.41	Basic	2.2 (1.7 - 2.6)
	Methane from oil and gas	1.78		
Forestry	Restoration of degraded forest	1.6 - 3.4	Basic	5.3 (4.1 - 6.5)
	Reducing deforestation	3		
Industry	Energy efficiency - indirect	1.9	Basic (indirect emissions)	See energy sector potential
	Energy efficiency - direct	2.2		
	Renewable heat	0.5	Basic	5.4 (4.2 - 6.6)
	Non-CO ₂ greenhouse gases	1.5		
	CCS	1.22		
Transport	Heavy Duty Vehicles potential (efficiency, mode shift)	0.88	Basic	4.7 (4.1 - 5.3)
	Light Duty Vehicles potential (efficiency, mode shift, electric vehicles)	2.0		
	Shipping efficiency	0.7		
	Aviation efficiency	0.32 - 0.42		
	Biofuels	0.63 - 0.81		
Other	Landfill gas recovery	0.4	Basic	0.4 (0.3 - 0.5)
	Enhanced weathering measures	0.73 - 1.22		
Total basic emission reduction potential				33 (30 - 36)
Total emissions reduction potential including additional measures				38 (35 - 41)

Note: Although for many emission reduction categories a single point estimate is given, there are always uncertainties, assumed to be ± 25 percent. For the categories peatland degradation and peat fires, biochar and energy efficiency, the potential in 2030 is more uncertain. Therefore, a higher uncertainty range of 50 percent is applied to these categories. In the final column, the categories are aggregated to the sectoral level. The numbers in the third column are not corrected for overlap between measures. The numbers in the final column are corrected for overlap, and this is also reflected in the total potential. Therefore, the total is smaller than the sum of the individual potentials in the third column. The aggregate potentials for indirect emission reductions in buildings and industry are reflected in the electricity sector potential.

Source : UNEP, 2017