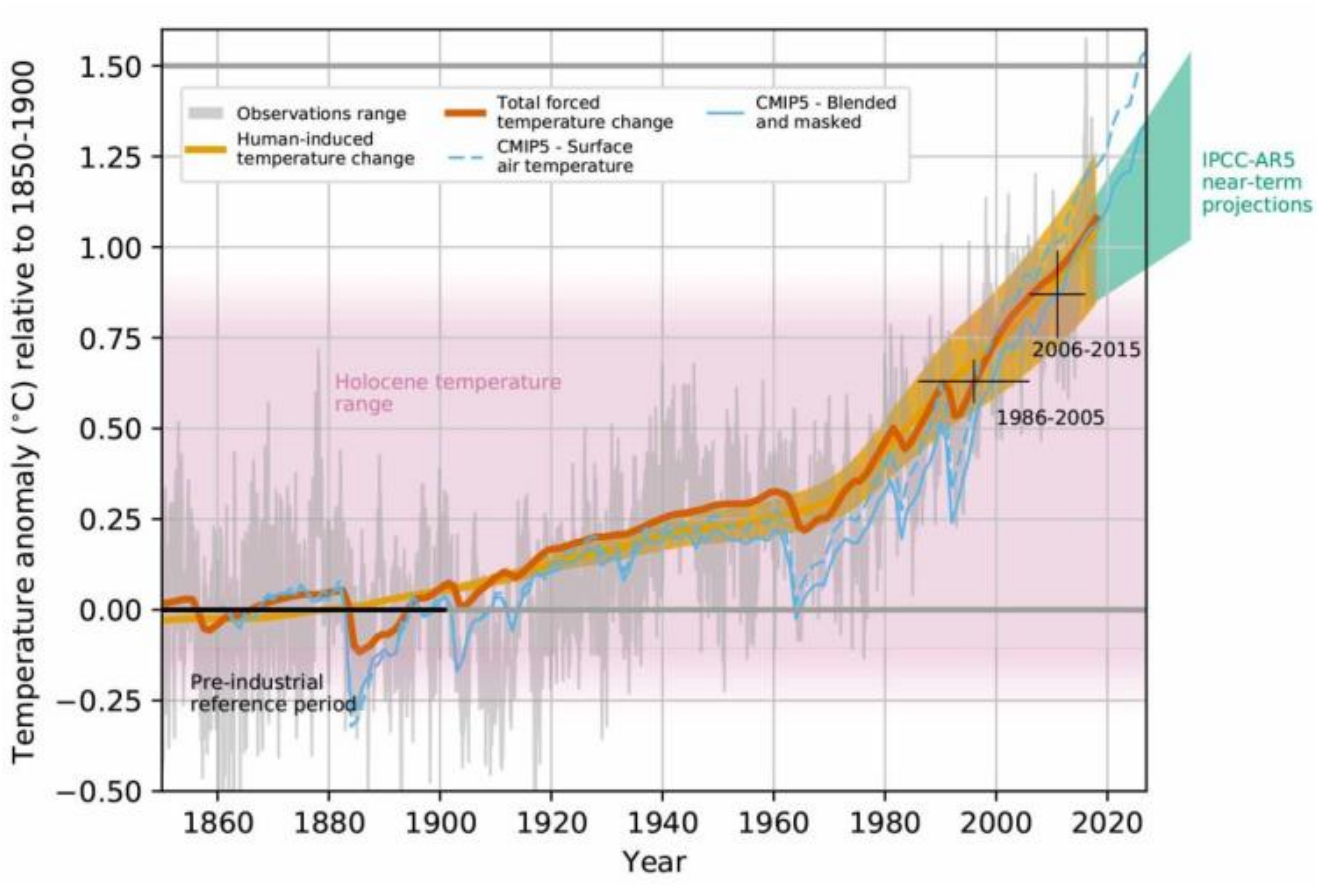
Rapport Spécial du GIEC (Octobre 2018)

RÉSUMÉ SYNTHÉTIQUE PAR LE MOUVEMENT INGENIEURS ENGAGES



Lecteurs - Rédacteurs : Théo A. ; Anna B. ; Nicolas B. ; Laura D ; Baptiste G ; Thomas K. ; Cécile L. ; Margot M. ; Alexandre P. ; Jules R. ; Romain R. ; Henri V. ; Vladimir Z.

Table des matières

Introduction 3
I- Cadrage et contexte 4
1.1 Objectifs du rapport 4
1.2 Mesure du réchauffement climatique actuel 4
1.3 Des scénarios cohérents 6
1.4 Augmenter la réponse globale 7
II- Description des scénarios 8
2.1 Introduction aux scénarios 8
2.2 Contraintes géophysiques 8
2.3 Budget carbone et incertitudes 9
2.4 Les différents types de scénarios 9
2.5 Principales caractéristiques des scénarios à 1.5°C 10
2.6 Connaissances manquantes 14
2.7 Résumé : les grandes lignes des scénarios du GIEC 14
III- Impacts d'un réchauffement climatique à 1.5°C 15
3.1. Comment les risques à +1,5°C et plus sont-ils estimés ? 15
3.2 Changements climatiques globaux et régionaux et dangers associés 16
3.3 Impacts observés et projection des risques sur les systèmes naturels et humains 19
3.4 Impacts évités et réduction des risques à +1,5°C par rapport à +2°C 21
IV - Renforcement et ajustement de la réponse globale 24
4.1 Solutions de mitigation et d'adaptation 24
4.2 Solutions de géo-ingénierie 26
4.3 Mise en œuvre de changements rapides et ambitieux 27
Conclusion 30
Annexes 31
Annexe 1: Contexte du Rapport 31
Annexe 2: Les scénarios 32
Annexe 3: Indicateurs de faisabilité des options d'adaptation et d'atténuation 33

Introduction

Dans le cadre des accords de Paris signés lors de la COP21, un rapport spécial a été demandé au **GIEC**[1] afin de mieux comprendre les enjeux et les moyens à mettre en œuvre afin de limiter le réchauffement climatique à 1.5°C.

Le Mouvement Ingénieurs Engagés s'est proposé de faire une lecture collective de ce rapport Ce document représente la synthèse écrite des membres ayant participé à cette lecture et il reprend, chronologiquement, les différents chapitres du rapport du GIEC et synthétise les idées principales soulevées. Nous précisons bien que les figures présentes dans ce résumé proviennent directement du rapport spécial du GIEC rendu public en octobre 2018, rapport qui s'intitule « IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C ».

Ingénieurs Engagés

Ingénieurs Engagés (IE) est une fédération visant à repenser la place de l'ingénieur·e dans la société. Elle est composée de plusieurs groupes, locaux et thématiques, portant des actions ou des réflexions en cohérence avec les valeurs portées par sa charte, centrée sur les problématiques sociales et environnementales. Le mouvement associé se veut apartisan, il privilégie les débats, l'ouverture d'esprit et s'intègre dans un cadre horizontal.

[1] **GIEC :** Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. En anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) **.** Il a pour mission de fournir aux décideurs, à intervalles réguliers, des évaluations scientifiques liées aux changements climatiques, à leurs conséquences et aux risques susceptibles d'y être liés et de présenter des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Le GIEC ne conduit pas ses propres travaux de recherche. Il évalue les publications scientifiques mondiales et détermine les points qui font consensus ou non.

I- Cadrage et contexte

1.1 Objectifs du rapport

En se basant sur le rapport **AR5**[2] et les publications postérieures à ce dernier, la nouvelle synthèse écrite par le GIEC vise à actualiser les connaissances sur le changement climatique et faire un point sur l'objectif d'un **réchauffement**[3] de +1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900).

Le rapport s'inscrit dans les objectifs du **développement durable**[4] et met particulièrement en avant la notion **d'équité**[5], ainsi que l'objectif d'éradication de la pauvreté. Les impacts du réchauffement climatique et les efforts à fournir étant très différents selon les pays, il apparaît aujourd'hui que ce sont les moins responsables du réchauffement qui en subiront les plus lourdes conséquences. Les populations les plus pauvres sont également les plus vulnérables, et doivent être intégrées dans la transition bas-carbone.

1.2 Mesure du réchauffement climatique actuel

Le réchauffement climatique d'origine humaine a d'ores et déjà atteint +1 °C, augmentant de 0,2 °C par décade. Les sociétés et modes de vie actuels sont non soutenables. Si les Etats parvenaient à tenir les engagements nationaux qu'ils se sont fixés à l'horizon 2030, le réchauffement atteindrait tout de même +3 à +4 °C. Ce réchauffement climatique est lié aux émissions massives de Gaz à **Effet de Serre**[6] (GES) dans l'atmosphère, et notamment le dioxyde de carbone (CO2).

---

[2] **AR5 :** "Fifth assessment report" publiée par le GIEC en 2014. 5ème d'une série de rapports dont le premier a été écrit en 1990, ce rapport fournit une mise à jour du savoir concernant les aspects scientifiques, techniques et socio-économiques du changement climatique

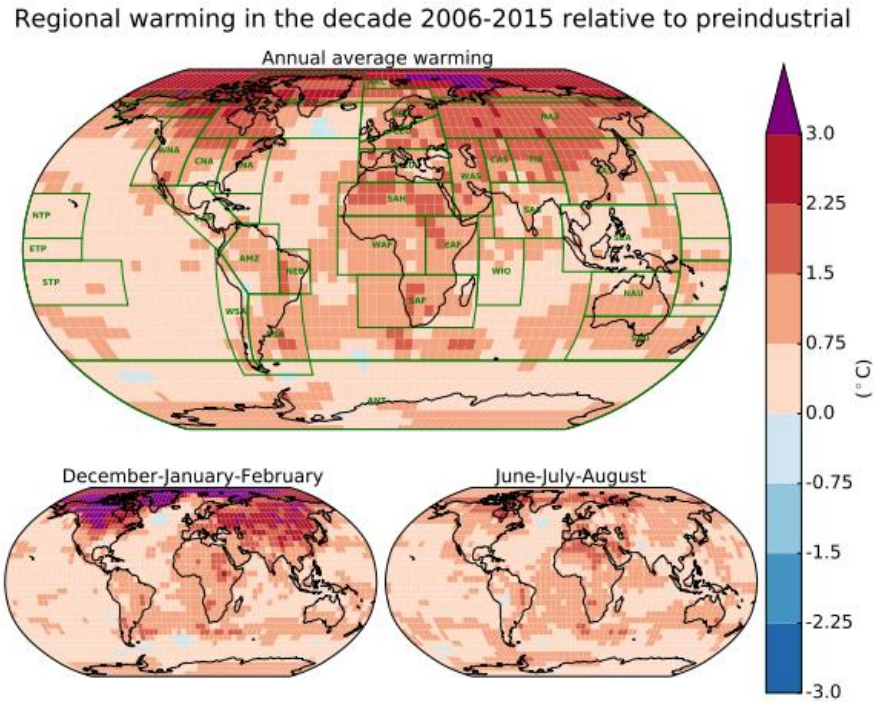
[3] **Réchauffement :** La méthode de calcul du réchauffement climatique par le GIEC est bien précise. La température de référence est la température moyenne mesurée pendant la période 1850-1900. La température à une date donnée est mesurée en faisant la moyenne de la température de la surface terrestre et maritime sur une période de 30 ans centrée sur cette date. Cette valeur s'appelle **Température de surface globale moyenne** (ou GMST en anglais, pour Global Mean Surface Temperature).

[4] **Développement durable :** "développement qui assure les besoins des générations présentes sans compromettre la possibilité aux générations futures d'assurer leurs besoins". L'ONU a défini un agenda développement durable pour l'horizon 2030, fixant 17 objectifs non contraignants à atteindre. Ces objectifs ont été jugés pour la plupart irréalistes et parfois incompatibles avec la volonté de lutter contre le changement climatique

[5] **Équité :** Selon le GIEC, celle-ci se décline en 3 composantes : Intergénérationnelle (entre générations), Internationale (entre nations), et Nationale (entre individus). Les asymétries sont principalement de quatre ordres : 1) différentes contributions au problème : pas la même responsabilité des populations; 2) différents impacts : les populations les moins responsables du réchauffement sont les plus touchées; 3) différentes capacités à créer des solutions et sous-représentation dans les processus de décision des personnes les plus vulnérables; 4) différente capacité de réponse future.

[6] **Effet de Serre :** La Terre perd naturellement de la chaleur par rayonnement vers l'espace. Les gaz à effet de serre (GES) absorbent ce rayonnement et piègent la chaleur, augmentant ainsi la température terrestre. On parle également de forçage radiatif pour désigner l'énergie piégée par les GES.

Un réchauffement global à +1,5 °C ne signifie pas que toutes les régions seront affectées de la même manière ni avec la même intensité. Certaines sont déjà touchées plus fortement à l'heure actuelle. Le réchauffement climatique est plus important sur les continents que sur les océans, et 20 à 40 % de la population mondiale a déjà connu, localement, un réchauffement supérieur à 1.5 °C entre 2006 et 2015. La figure suivante extraite du rapport illustre ce phénomène.



Réchauffement climatique régional par rapport à l'ère préindustrielle durant la décade 2006-2015

Il est à noter que depuis 2000, le réchauffement d'origine humaine se confond avec le réchauffement climatique global : l'homme est devenu un facteur de changement plus fort que les phénomènes naturels. Ce constat pousse de nombreux scientifiques à émettre l'idée que la terre est entrée dans une nouvelle ère géologique : **l'anthropocène**[7]. La rapidité des changements climatiques provoqués par les humains surpasse largement celle des forces géologiques ou biologiques, même dans les changements passés.

[7] **Anthropocène :** Encore débattue, un consensus se développe autour de cette idée suite aux travaux de nombreux chercheurs. La "création" de cette nouvelle ère géologique pour caractériser notre époque nous demande de comprendre les interactions entre l'homme et son environnement et donc, in fine, d'appréhender comment lutter contre le réchauffement climatique.

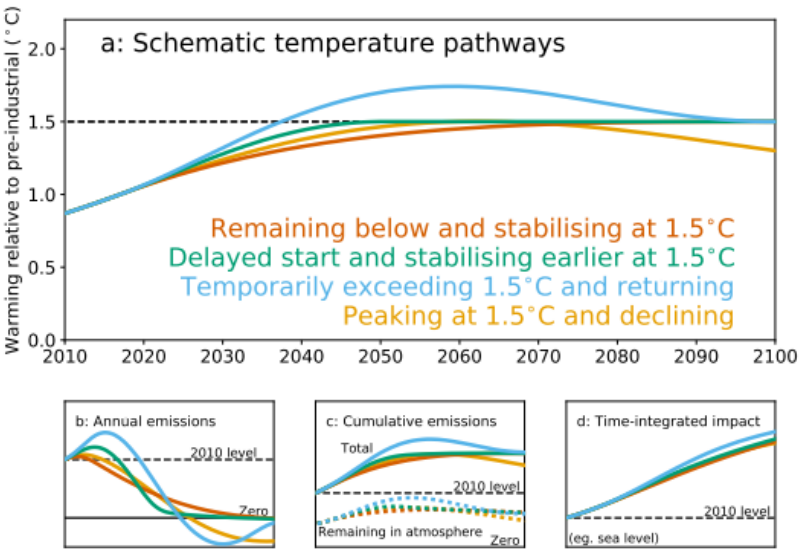
1.3 Des scénarios cohérents

Le rapport présente différents **scénarios cohérents**[8] pour respecter les objectifs fixés par l'accord de Paris. Parmi ces scénarios, certains dépassent momentanément l'objectif de 1,5 °C avant de retomber sous cette température avant la fin du siècle.

Les impacts à +1,5 °C dépendent fortement de la trajectoire empruntée et sont **non-linéaires**[9]. Par exemple, un scénario de dépassement momentané entraînerait des impacts beaucoup plus graves que d'autres scénarios. Ainsi, la trajectoire prise par ces scénarios peut demander des efforts conséquents, et avoir des impacts différents de plus ou moins grande intensité sur le long-terme.

Les trajectoires suivies doivent prendre en compte l'évolution des connaissances en climatologie, et s'adapter aux changements réellement observés qui peuvent être plus importants que prévus à l'origine. Ce sont des trajectoires dites "adaptatives". Les trajectoires doivent également être **résilientes**[10], c'est-à-dire combiner des mesures d'atténuation et d'adaptation (voir ci-dessous).

Même limité à 1,5 °C, le réchauffement climatique pourrait entraîner des conséquences catastrophiques. Il est en effet difficile de prévoir les impacts de manière certaine à cause des nombreux paramètres évoluant de manière non-linéaire avec l'augmentation de la température, de la combinaison des impacts entre eux et des incertitudes liées aux modèles utilisés.



Différentes trajectoires cohérentes avec l'objectif de +1,5 °C
a)Température de surface globale moyenne

[8] **Scénarios cohérents :** un scénario est considéré comme cohérent avec les accords de Paris s'il a 50 à 66 % de chances, au vu des connaissances climatologique actuelles, de restreindre l'élévation de la température en dessous de la barre des 1,5 °C où d'atteindre cette valeur vers 2100 après un dépassement. De tels scénarios ont quand même une chance non négligeable de dépasser 1,5 °C.

[9] **Non-linéarité :** Les impacts évoluent de manière non linéaire avec la température. Cela signifie qu'une petite augmentation de température supplémentaire entraînera de gros impacts supplémentaires.

[10] **Résilience :** La résilience d'un système correspond à sa capacité d'adaptation face aux chocs et aux changements.

b) Taux d'émissions de CO2 annuels
c) Cumul des émissions de CO2 (en pointillés, la proportion encore présente dans l'atmosphère)
d) Intégration des impacts en fonction du temps (la courbe continue à croître même si la température de surface globale moyenne s'est stabilisée)

1.4 Augmenter la réponse globale

On distingue plusieurs grands types de réponses à mettre en place : les stratégies d'**atténuation**[11], les stratégies d'**adaptation**[12], l'extraction de CO2 (CDR pour "Carbon Dioxide Removal") et la **remédiation**[13]. D'importantes mesures d'atténuation sont nécessaires pour envisager d'atteindre les objectifs fixés par l'accord de Paris.

Le rapport insiste sur la nécessité de créer des synergies entre les différentes stratégies possibles ainsi que sur la transformation profonde de nos modes de vie. Aujourd'hui, la croissance économique entraîne une croissance de la consommation d'énergie et des émissions de GES. En plus du développement de technologies bas carbone, il est nécessaire de découpler la croissance économique du réchauffement climatique.

Par ailleurs, une nouvelle forme de gouvernance est nécessaire pour combiner ces stratégies tout en prenant en compte les objectifs d'équité, de justice et d'éradication de la pauvreté. Cette nouvelle gouvernance doit inclure tous les acteurs institutionnels ainsi que tous les citoyens, notamment les plus impactés par le réchauffement climatique.

Le rapport du GIEC s'intéresse aux trajectoires résilientes qui prennent également en compte les objectifs du développement durable. Toute stratégie implique nécessairement des synergies et des compromis.

[11] **Atténuation :** limiter le réchauffement futur en réduisant ou en empêchant les émissions de GES.

[12] **Adaptation :** gérer les impacts du changement climatique.

[13] **Remédiation :** géo-ingénierie afin de réduire de manière temporaire ou de compenser le réchauffement.

II- Description des scénarios

Le GIEC présente des scénarios d'atténuation compatibles avec un réchauffement à 1,5 °C dans le contexte du développement durable. Il s'intéresse notamment à la faisabilité géophysique, technologique et économique de tels scénarios.

2.1 Introduction aux scénarios

Pour définir ses trajectoires, le GIEC utilise des **modèles à évaluation intégrés**[14] (IAM), qui permettent, à partir d'hypothèses, de modéliser l'évolution du climat. Ainsi, parmi les 411 scénarios étudiés, 90 aboutissent à une trajectoire compatible avec l'objectif de 1,5 °C, avec ou sans dépassement temporaire. Compte tenu des incertitudes, ces scénarios ont, au mieux, deux chances sur trois de respecter l'objectif. Dans ce rapport, le GIEC a retenu 4 scénarios cohérents avec les accords de Paris.

2.2 Contraintes géophysiques

Dans la plupart des scénarios, le **maximum de température**[15] a lieu environ 10 ans après que les **émissions nettes**[16] de CO_2 atteignent zéro.

Scénarios 1,5 °C(*)	**Scénarios 2 °C(*)**
Maximum de température avant 2050	Maximum de température après 2050
Concentration atmosphérique de CO_2 en 2100 < à celle de 2016	Concentration atmosphérique de CO_2 en 2100 5 à 10 % > à celle de 2016

(*) La plupart des scénarios

[14] **Modèles à évaluation intégrés :** ces modèles prennent en entrée des hypothèses sur l'évolution des facteurs socio-économiques (population, consommation, croissance économique, comportements, technologies, cadres légaux, institutions…). Ils permettent d'évaluer l'impact de choix sociétaux (économiques, technologiques) sur différents indicateurs environnementaux et économiques de sortie. Parmi les indicateurs de sortie, on trouve les émissions de CO_2 et les autres gaz impactant le forçage radiatif. Le GIEC introduit ensuite ces indicateurs d'émissions en sortie des IAM dans des modèles climatiques simplifiés afin de calculer pour chaque modèle les probabilités de l'évolution de la température globale.

[15] **Maximum de température :** Même après avoir stoppé les émissions, la température continuera de monter.

[16] **Émissions nettes :** Les émissions nettes correspondent à la différence entre les émissions de CO_2 et la capture de CO_2 par l'Homme.

2.3 Budget carbone et incertitudes

Sur la base des modèles IAM, le GIEC évalue un budget carbone, c'est-à-dire la quantité maximale de CO_2 restante (à partir de 2018) qu'il est possible d'émettre dans l'atmosphère tout en maintenant la cible de température en fin de siècle. En 2017, 41 milliards de tonnes de CO_2 ($GtCO_2$) ont été émises, et environ 300 $GtCO_2$ ont été émises durant les 6 dernières années.

Le budget carbone évalué par le GIEC est donné ci-dessous :

Budget carbone (au 01/01/2018) en $GtCO_2$	**Probabilité de maintenir le réchauffement global en dessous de 1,5 °C en 2100**
1080	**33 %**
770	**50 %**
570	**67 %**

Il existe néanmoins des incertitudes importantes sur ce budget, qui ont pu être chiffrées[17]. Par exemple, certains phénomènes causés par le réchauffement climatique sont susceptibles d'accélérer ce réchauffement (notamment la fonte du permafrost, libérant des GES). Ces phénomènes (appelés "boucles de rétroactions positives") ne sont pas tous pris en compte.

2.4 Les différents types de scénarios

En annexe 2, une figure résume et détaille les différents scénarios retenus par le GIEC.

Facteurs socio-économiques

Les trajectoires possibles dépendent logiquement des futurs niveaux de population, de croissance économique, d'inégalité et de progrès technologique. Le travail du GIEC se base sur 5 "**trajectoires socio-économiques communes[18]**" (SSP). En classant les différents modèles dans l'une ou

[17] Voici les estimations des incertitudes sur le budget carbone. Une valeur négative signifie que moins de carbone que prévu pourra être émis pour respecter l'objectif.

- Boucles de rétroaction du système Terre qui ne sont pas prises en compte par les modèles (fonte du permafrost notamment) : -100$GtCO_2$
- Variantes des scénarios sur l'émission des « forceurs climatiques » hors CO_2 (notamment les autres gaz à effet de serre, les aérosols, l'albédo) : ± 250 $GtCO_2$
- Sur l'impact des « forceurs climatiques » hors CO_2 (notamment les aérosols) : -400 à + 200 $GtCO_2$
- Sur la distribution probabiliste du ΔT en fonction des émissions de CO_2 : + 100 à +200 $GtCO_2$
- Sur l'historique des températures (donc le réchauffement effectif aujourd'hui) : ± 250 $GtCO_2$
- Sur les émissions récentes : ± 20 $GtCO_2$

[18] **SSP** (Shared Socio-Economic Pathways) Scénarios d'évolution probables des sociétés basés sur des projections quantitatives de facteurs socio-économiques tels que la population, le PIB, et l'urbanisation.

l'autre des catégories de SSP, le GIEC aboutit au fait que tenir une trajectoire 1,5 °C est plus difficile si :

- La population est élevée,
- La consommation (énergie, alimentation) par personne est trop élevée,
- Les inégalités sont élevées,
- De fortes rivalités régionales existent

Trajectoires 1,5 °C avec un dépassement nul ou limité (0 à 0,2 °C) :

Les trajectoires qui ne dépassent pas la barre des 1.5°C, même temporairement, sont celles limitant le plus les impacts. Les transformations requises pour ces scénarios sont, en amplitude, similaire à celles requises pour des scénarios à 2°C, mais doivent être déployées plus rapidement. Plus la réduction des émissions de CO_2 est lente, plus un dépassement avant stabilisation à 1,5 °C est probable.

Une trajectoire sans dépassement implique de respecter les objectifs suivants :

- Atteindre des émissions nettes de CO_2 nulles en 2050,
- Le pic d'émission doit avoir lieu avant 2030, avec une réduction marquée des émissions en 2030
- Diminuer de manière importante l'émission des autres substances jouant sur le forçage radiatif, notamment le méthane

Trajectoires avec un dépassement temporaire

Pour les trajectoires impliquant un dépassement, il est nécessaire de mettre en œuvre des systèmes de capture et stockage de CO_2 (CSC). En effet, pour revenir à 1,5 °C après un dépassement, il faudra diminuer la concentration globale de CO_2.

Les solutions de stockage retenues par le GIEC sont la reforestation et les centrales bioénergétiques avec capture et stockage du carbone. Les centrales bioénergétiques incluent tous les types de production énergétique (électricité, carburant liquide, biogaz, production d'hydrogène) à partir d'éléments biologiques (bois, algues, déchets alimentaires, …) Le niveau de déploiement de chacune de ces solutions dépend des scénarios. Selon le cas, le volume de CO_2 à stocker est compris entre 0 et 46 $GtCO_2$

2.5 Principales caractéristiques des scénarios à 1.5°C

Les scénarios compatibles avec un réchauffement de 1.5°C présentent des éléments d'ordre sociaux, économiques, énergétique, technologiques, politiques.

A- Transformation du système énergétique

L'énergie est l'élément central de nos sociétés. C'est grâce à l'énergie abondante et facilement accessible produite à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) que l'humanité a pu connaître des progrès fulgurants depuis le début de l'ère industrielle (1850-1900). Si ces énergies ont permis d'augmenter le niveau de vie et de connaissance, leur utilisation est la principale source

d'émission de gaz à effets de serre. Les enjeux climatiques actuels doivent pousser le système énergétique des sociétés industrialisées à subir une profonde transformation.

Cette transformation passe avant tout par :

- La diminution de la demande énergétique (la consommation d'énergie)
- La diminution des émissions de CO_2 dues à la production d'électricité
- Le remplacement à grande échelle par des systèmes électriques pour l'utilisation finale de l'énergie (électrification)
- La diminution des émissions de CO_2 par les énergies non électriques.

La principale différence entre les scénarios à 1.5 et 2°C est la vitesse d'électrification et de diminution de la consommation dans la 1ere moitié du siècle

Production d'énergie et évolution du système

Les systèmes de production d'énergie cohérents avec une limitation à 1.5°C comportent une grande part d'énergie issue de sources à faible émission de carbone (nucléaire, énergies renouvelables, énergies fossiles avec dispositifs de capture et de stockage de CO_2) et vont avec une électrification des usages finaux.

Dans les trajectoires à 1.5°C la part de renouvelables dans la production d'énergie primaire (avant transformation pour d'autres usages) est entre 28% et 88% en 2050. Un certain nombre d'entre eux sont caractérisés par une croissance de l'utilisation de la biomasse associée à la CSC. Dans la plupart des scénarios, la part du nucléaire augmente jusqu'en 2050. Une caractéristique commune à tous les scénarios est une diminution de la part des énergies fossiles entre 2020 et 2050.

Afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050, les transformations suivantes sont nécessaires

- 1 à 7% de l'énergie primaire apportée par le charbon en 2050
- -32 à -74% d'usage du pétrole en 2050 par rapport à 2020
- -13 à -60% d'usage du gaz en 2050 par rapport à 2020

Electrification et décarbonation

Entre 2020 et 2050, la part d'électricité comme énergie finale doit doubler par rapport à 2020. Il est également nécessaire de diminuer les émissions liées à la production d'électricité, qui doivent passer 140g de CO_2 par Mégajoule (MJ) aujourd'hui, à 11g/MJ en 2050.

Utilisation de l'énergie par secteurs

La principale différence entre les scénarios à 2°C et à 1.5°C se trouve dans l'utilisation de l'énergie. En plus de l'électrification, de grandes optimisations énergétiques sont nécessaires dans l'objectif de décarboner l'énergie. Le graphe suivant montre que pour rester en dessous de la barre des 1.5°C, il faut atteindre la neutralité carbone en 2050 et que les tendances d'évolutions sont très différentes dans les domaines d'utilisation

Le secteur de l'industrie est le principal émetteur. En plus des solutions évoquées précédemment, l'industrie nécessite l'utilisation de la CSC pour atteindre les objectifs de 1.5°C.

Le secteur BTP représente quant à lui 34% de la consommation d'énergie. Cette consommation augmente de 20% en raison de l'amélioration des conditions de vie. La diminution des émissions passe aussi par une électrification (60% pour 1.5°C) et une diminution de la demande.
Les transports représentent 28% de la demande mondiale en énergie et 23% des émissions de CO_2 en 2014. Il est très difficile à décarboner en raison de sa demande en énergie fossile (92% de son énergie). Des pistes d'amélioration dans ce secteur sont cependant envisagés :

- Utilisation de véhicules électriques
- Changement structurels : favoriser certains modes de transport, réduction de la mobilité
- Amélioration de l'efficacité
- Biofuel faible en CO_2

Ces éléments peuvent permettre de réduire la consommation d'énergie de 60% par rapport au scénario de base. Le développement des biocarburants et des véhicules électriques est actuellement trop faible, les augmentations préconisées sont extrêmement rapides. Les transports maritimes et aériens, dont le nombre va augmenter, sont plus difficiles à décarboner.

B- Stockage et Capture du Carbone (CSC)

Cette technologie constitue un des points clés pour certains scénarios à 1.5°C, surtout pour ceux à forte demande en énergie, peu décarbonée. L'efficacité de cette technique est déterminée par le taux de capture. Un taux de capture élevé est possible mais uniquement à coût élevé pour le moment.
En termes de capacité de stockage, toutes les évaluations semblent montrer que la capacité est supérieure aux besoins en stockage du 21e siècle. La principale limitation de cette technologie est le manque de développement. Cependant, il existe d'autres inconvénients à prendre en compte par rapport aux CSC :

- Dans le cas d'un scénario avec dépassement temporaire des +1.5°C, les limites d'échelle, de vitesse, d'acceptabilité des mesures de CSC limitent l'amplitude du dépassement envisageable.
- La réaction du cycle du carbone en cas d'absorption nette de CO_2 est inconnue. Cela entraîne une incertitude sur l'efficacité de ces méthodes à réduire la température.
- La faisabilité du déploiement de la capture de carbone à grande échelle est incertaine, et s'appuyer sur cette technologie présente un risque majeur vis-à-vis de l'objectif +1,5°C

C- Transformation du secteur agricole

Le secteur agricole est très important pour atteindre les objectifs de 1.5°C. L'agriculture doit diminuer ses émissions tout en assurant la production de nourriture et la matière première pour les biocarburants et la biomasse.

Utilisation des terres

Dans les scénarios à +1.5°C, la surface utilisée pour les pâturages diminue en comparaison avec ceux à +2°C. La surface dédiée à la production de nourriture pour les humains et le bétail diminue. Ces diminutions sont compensées par une intensification de la production ainsi que des changements de consommation.

Le secteur agricole a aussi un rôle à jouer dans la diminution active des émissions grâce à la reforestation ou les bioénergies couplées au stockage.

Choix politiques et changement dans la consommation

La diminution de la surface dédiée aux pâturages et à l'augmentation de la surface dédiée à la forêt implique d'inverser totalement la dynamique historique et implique un changement radical de politique.
Ainsi, manger moins de viande et réduire le gaspillage alimentaire contribuerait à 40% des réductions d'émission du secteur en 2050. L'intensification de l'agriculture contribuera également à la réduction des émissions. En fonction des choix faits, les stratégies peuvent varier : des régimes faibles en viande, associés à des efforts de protection de la nature permettent de limiter le besoin en CSC et de mettre en place une reforestation. A l'inverse, une stratégie qui ne change pas la consommation est possible mais repose sur la bioénergie couplée au stockage.

En résumé, les experts soulignent l'importance des efforts à faire sur ce secteur pour rester en dessous de la barre des +1.5°C. Différentes stratégies sont possibles selon les objectifs sociétaux visés. L'avenir de ce secteur est cependant difficile à prédire car les dégâts causés par le réchauffement climatique sur les systèmes agricoles n'ont pas été pris en compte dans les quantifications scénarios socio-économiques.

D- Implications économiques et financière

Prix du carbone

Bien qu'un prix du carbone commun à tous les Etats soit pertinent, d'autres mesures sont également nécessaires :

- Mise en place de taxes carbones nationales
- Politiques contraignantes d'efficacité énergétique

Ces deux mesures combinées sont plus efficace qu'une simple taxe à 53$ la tonne. Une étude montre également que plus les réglementations sont ambitieuses, plus le coût du carbone diminue.

Investissements

Un changement drastique en termes d'investissement est nécessaire. En 2016, les investissements voués à l'énergie s'élevaient à 1700 milliards de dollars, et devraient augmenter jusqu'à atteindre potentiellement 3800 milliards de dollar par an.

Les investissements en énergie bas carbone doivent dépasser ceux dédiés aux énergies fossiles autour de 2025. Les investissements dans le charbon doivent cesser avant 2030.

E- Défis politiques, opportunités et impacts des transformations nécessaires

Afin d'atteindre les objectifs ambitieux des scénarios à 1.5°C, un cadre politique favorable est nécessaire. Certains facteurs sont déterminants pour la réussite des transformations:

- Favoriser la coopération internationale et les politiques orientées vers la diminution des émissions
- Rendre le coût du CO_2 bien plus élevé qu'aujourd'hui
- Développer l'innovation technologique et son déploiement

En revanche, certains éléments peuvent mettre en péril l'objectif de 1.5°C. Par exemple, la fragmentation des politiques climatiques ou le maintien d'une consommation non durable dans le contexte d'une forte dépendance aux énergies fossiles serait problématique. Un tel contexte politique pourrait rendre l'objectif des 2°C impossible à atteindre sans capture de carbone.

Pour finir, afin d'éviter le recours à la CSC, il est très important d'ajuster en priorité la demande et d'agir sur le court terme. Les questions alimentaires sont aussi fondamentales. Pour maintenir l'augmentation de température en dessous de 1.5°C et dans une vision en termes de coût social du carbone, le prix du CO_2 devrait être fixé à 100$ la tonne.

F- Développement durable dans un scénario à 1.5°C

Chaque scénario offre des synergies avec certains objectifs de développement durable mais nécessite des compromis avec d'autres. L'efficacité énergétique a une très bonne synergie avec le développement durable, contrairement à la limitation de l'offre.

De manière générale, les scénarios se basant sur une réduction de la demande, avec des politiques incitant au changement des comportements, une consommation plus responsable, des changements de régime et utilisant faiblement la CSC sont ceux présentant le plus de synergies avec le développement durable.

L'identification des interactions entre le développement durable et les moyens de limitation d'émissions est la clé pour choisir le scénario à suivre.

2.6 Connaissances manquantes

Il est encore difficile d'évaluer l'impact d'émission de CO_2 négative. L'utilisation de la CSC est encore floue : quel déploiement ? Quel niveau de technologie sera atteint ? Quels investissements ?

2.7 Résumé : les grandes lignes des scénarios du GIEC

- Profonde et rapide **décarbonation** de la production d'énergie : utilisation des renouvelables et utilisation de **capture et stockage du carbone** (CSC)
- Grands efforts de **diminution de la demande** en énergie et en biens de consommation intensifs en gaz à effet de serre
- Passer des énergies fossiles à **l'électricité** dans les secteurs finaux d'utilisation
- Diminution des émissions dans les prochaines décennies (**neutralité carbone en 2050)**
- Atténuation maximale des gaz à effet de serre autres que le CO_2
- Doublement de l'investissements dans les énergies bas carbones sur les 20 prochaines années
- Augmentation du coût des émissions (taxe carbone ou mesures réglementaires) de 3 à 4 fois plus que dans les scénarios 2°C

III- Impacts d'un réchauffement climatique à 1.5°C

Ce chapitre transdisciplinaire utilise des définitions et des constats des chapitres 1 et 2. Il fournit des éléments utilisés pour justifier les actions à prendre (voir chapitre 4 et 5). Il permet de comprendre les impacts déjà observés et de faire une projection des risques pour comprendre un monde à +1,5°C.

3.1. Comment les risques à +1,5°C et plus sont-ils estimés ?

A - Evolution climatique et temporelle

Une élévation de la température de +1,5 ou +2°C par rapport à la période préindustrielle peut être vue de différentes façons:

- Une période transitoire qui passe par ces températures
- Une vision à court terme (stabilisation à +1,5 ou 2°C en 2100)
- Une vision à long terme (stabilisation +1,5 ou 2°C après plusieurs millénaires).

Dans ce chapitre, les estimations sont majoritairement centrées sur les analyses concernant une période transitoire à +1,5 ou +2°C. Par ailleurs, la majorité des scénarios +1,5°C et quelques scénarios à +2°C comprennent un dépassement de ces températures durant le siècle. Les facteurs importants de dépassement à prendre en compte sont :

- Le pic de température du dépassement
- La durée du dépassement
- Les impacts associés sur la température globale durant la période de dépassement, par exemple le possible franchissement d'une boucle de rétroaction positive

B - Evaluation des impacts sur les systèmes naturels et les systèmes aménagés par l'Homme

On observe aujourd'hui des systèmes fortement modifiés par l'Homme et sur lesquels le climat joue un rôle secondaire. Utiliser des méthodes de détections d'impacts sur ces systèmes dégradés peut permettre des estimations d'impacts futurs causés par le dérèglement du climat sur des systèmes aujourd'hui peu dégradés.

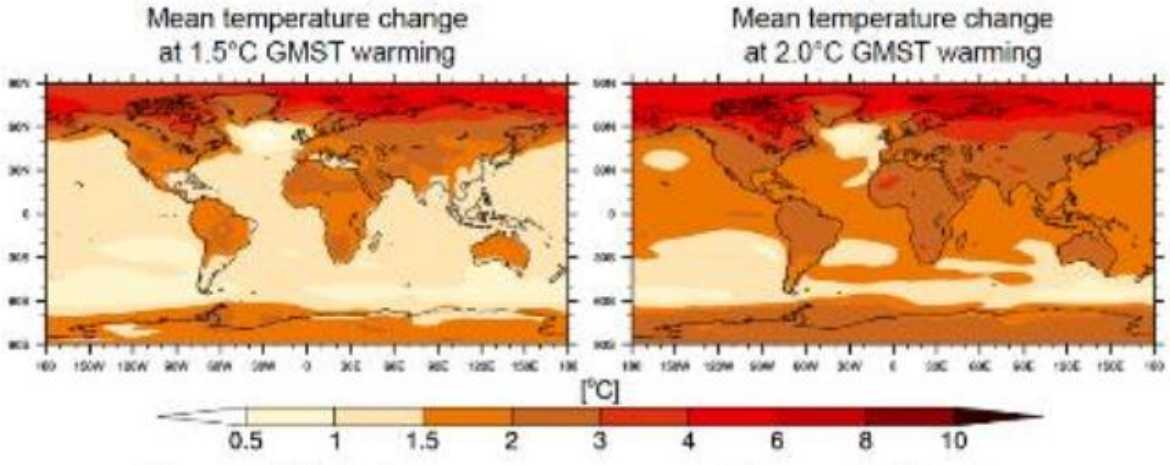
Pour comparer les effets à +1,5°C et à +2°C, on peut identifier des impacts qu'il y a eu entre lors de l'élévation de +0,5°C à +1°C et supposer que les impacts augmentent linéairement pour une plus forte élévation de températures. Il est aussi possible de réaliser des modélisations avec des relations plus complexes. Cependant, la transposition des effets locaux aux niveaux régionaux implique une propagation des incertitudes : il convient donc de rester vigilant avec les hypothèses que l'on peut prendre.

Enfin, les chiffres avancés dans ce chapitre sont des estimations et ne sont pas fiables à 100%.

3.2 Changements climatiques globaux et régionaux et dangers associés

A. Changement climatiques globaux

Un réchauffement global à +1,5 ou +2°C pourrait entraîner une hausse des températures pouvant aller jusqu'à +3°C en saison chaude pour les latitudes moyennes et jusqu'à +4,5°C en saison froide pour les latitudes élevées. Le nombres de jours habituellement chauds augmente le plus dans les tropiques. Enfin, dans un scénario +2°C, 420 millions de personnes en plus risques d'être exposées à des vagues de chaleur extrêmes par rapport à un scénario +1,5°C. Enfin, on peut clairement voir sur la figure ci-dessous qu'un réchauffement du globe de +1,5°C implique un réchauffement encore plus important sur les terres.



Augmentation de la température moyenne sur les différentes zones du globe pour un scénario +1,5°C (gauche) ou +2°C (droite)

Les parties suivantes développent différents risques associés à ce réchauffement global. Il faut garder à l'esprit que certaines régions seront sujets à différents types de risques, parfois simultanément.

B. Températures régionales

Le faible nombre de mesures dans certaines régions du monde, en particulier aux pôles et en Afrique, limite la fiabilité des estimations régionales sur les températures moyennes et extrêmes.

Les plus fortes élévations de chaleurs extrêmes, caractérisées par une augmentation de la température et du taux d'humidité, pourraient se localiser en Amériques Centrale et Nord-Est, en Europe centrale et du Sud, en Méditerranée, en Asie Centrale et de l'Ouest et au Sud de l'Afrique. Les plus fortes élévations de la température moyenne sont situées dans les latitudes élevées. Ceci est dû aux rétroactions de l'**albédo**[19] de la glace et de la neige dont la surface diminue (mécanisme d'amplification polaire).

[19] **Albédo :** valeur physique qui permet de connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchie par une surface. Concernant le climat, cette variable est importante car elle exprime la part de rayonnement solaire qui va être renvoyée par l'atmosphère et la surface terrestre vers l'espace et qui donc ne servira pas à chauffer la planète.

Par ailleurs, des évènements de chaleurs extrêmes impacteraient des zones densément peuplées. A +1,5°C, 13,8% de la population mondiale sera exposées à de sévères vagues de chaleur extrêmes au moins 1 fois tous les 5 ans. A +2°C ce chiffre passe à 36.9% de la population mondiale, soit une différence de 1,7 milliards de personnes.

C. Précipitations

L'estimation des futures précipitations est plus complexe que celle des températures. Néanmoins, il y a une tendance à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations fortes. Selon les modèles actuels, on observe :

- Une diminution des précipitations en Méditerranée, Europe du Sud, Péninsule Arabe et Egypte.
- Une baisse du nombre de jours de pluies et une augmentation de l'intensité des pluies ainsi qu'une apparition retardée de la saison des pluies en Afrique
- Une augmentation importante des précipitations, en hiver, en Europe centrale et en Europe du Nord. En été, une augmentation seulement pour l'Europe du Nord et une diminution pour l'Europe du Centre.

Concernant la mousson, elle va s'intensifier mais pas de différence claire entre +1,5 et +2°C.

D. Sécheresse

Pour un réchauffement de +1,5°C, une augmentation des sécheresses en région méditerranéenne et dans le sud de l'Afrique est constatée. L'augmentation est bien plus forte pour un scénario à +2°C. L'assèchement est déjà détectable en région méditerranéenne

E. Ruissellement et des inondations

On observe depuis 1950, une augmentation des inondations en terme de fréquence et d'intensité. Dans les scénarios à +1,5°C et +2°C, la tendance est à une augmentation des significatives des ruissellements ainsi que des dangers liés aux inondations.

F. Cyclones tropicaux et ouragan

De nombreuses contradictions entre les résultats des études scientifiques existent et nous bénéficions de seulement 40 années d'observations. Les prévisions/tendances concernant les effets du changement climatique sur les cyclones sont donc assez peu fiables. La tendance est à une baisse en fréquence et à une augmentation en intensité.

E. Océans

Les observations issues des modélisations montrent une augmentation de la température sur les couches supérieures (0–700 m). Une élévation de la température de surface des 3 océans entre 1950–2016 a été constatée (+ 0.11°C, 0.07°C, et 0.05°C par décennies pour les océans Indien, Atlantique et Pacifique respectivement)

Par ailleurs, un affaiblissement de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (**MOC**[20]) et un ralentissement de 30% du Gulf Stream depuis fin 1950 ont été observés ces dernières décennies.

H. Banquise

Une diminution de sa surface et son épaisseur semble inéluctable pour un réchauffement à +1,5°C. L'Arctique connaîtra au moins une fois un été sans banquise après 100 ans de stabilisation à +1,5°C. Ce sera le cas après seulement 10 ans de stabilisation à +2°C. Une période intermédiaire de surélévation de température n'aura pas de conséquence à long terme pour la banquise.

I. Niveau de la mer

Il existe 3 catégories pour évaluer ce niveau : le niveau mondial du niveau de la mer (GMSL), les variations régionales autour de cette moyenne, et les effets dues aux ouragans, aux marées, etc.

La contribution des glaciers au GMSL est la suivante : élévation de 54-97 mm par rapport à aujourd'hui à +1.5ºC. Cette élévation est de 63-112 mm à +2ºC (intervalle de confiance choisi à 90%). Globalement, le GMSL sera plus haut de 0,1m à +2°C comparé à +1,5°C. Son augmentation continuera bien après 2100.

J. Chimie des océans

La chimie des océans prend en compte le pH, la salinité, les taux d'oxygène, de CO_2 et de beaucoup d'autres ions et gaz.

Environ 30% du CO_2 émis par l'activité humaine a été absorbé par les océans, ce qui conduit à l'acidification de ces derniers (par réaction avec les molécules d'H20). Le pH a quant à lui diminué de 0,1 depuis la période préindustrielle : cette diminution est un changement sans précédent depuis 65 millions d'années. Enfin, l'augmentation de la température de surface a réduit de 2% l'oxygène présent dans les océans depuis 1960. La conséquence de cela est une augmentation de la fréquence de « zones mortes », zones où le taux d'oxygène est trop bas pour permettre la vie.

[20] **MOC :** La circulation méridienne de retournement (MOC) de l'Atlantique est une composante clé du système climatique global, via son rôle dans la redistribution de chaleur, d'eau douce et de propriétés chimiques entre hautes et basses latitudes.

3.3 Impacts observés et projection des risques sur les systèmes naturels et humains

A. Eau potable et eau souterraine

Des pénuries d'eau seront observées. A +2°C, une augmentation de l'exposition à la pénurie de 8% serait observée (contre +4% pour +1,5°C) . Elle toucherait principalement l'Europe, l'Australie, et l'Afrique du sud

Les inondations pourraient se multiplier avec des risques importants. Ces impacts concernent avant tout les Etats-Unis et l'Europe

On estime que 500 millions de personnes seraient exposées à des sécheresses pour un réchauffement de +2°C. Ce chiffre serait de 300 millions à +1,5°C. Les régions potentiellement impactées sont le bassin méditerranéen, l'Afrique et l'Asie du Sud Est. Ces sécheresses pourraient avoir les impacts suivants :

- Diminution de l'énergie disponible pour les barrages (selon les pays)
- Réduction de la capacité des centrales à se refroidir
- Diminution de la qualité de l'eau
- Erosion des sols

B. Écosystèmes terrestres

Le nombre d'espèce diminuera fortement. Les effets sur la biodiversité pourraient être doublés entre +1.5 et 2°C.

Des **puits de CO_2**[21] deviendraient des sources de CO_2 : Les forêt arctique seraient par exemple beaucoup plus exposées à des feux de forêts.

C. Ecosystèmes marins

Des espèces pourraient disparaître (corail, mangroves et herbiers marins par exemple). Certaines espèces marines seraient en revanche favorisées.

Près de 70% du corail a aujourd'hui disparu. A +2°C, leur disparition est quasiment certaine. Afin d'éviter ces écosystèmes très riches en biodiversité, Il est nécessaire de protéger ces lieux de la pollution et de l'urbanisation

[21] **Puit de CO_2 :** Systèmes qui tendent naturellement à diminuer le taux de CO_2 dans l'atmosphère. Par exemple, la croissance des plantes capte du CO_2 via la photosynthèse.

Les organismes à la base du régime alimentaire océanique sont très impactés par le réchauffement climatique. Cela met en danger toute la chaîne alimentaire océanique, et les conséquences sont pour la plupart inconnus.

La famille des bivalves sera durement touchée (huîtres, moules,...) En effet, tous les animaux ayant une coque, ne seront plus en capacité de produire cette coque.

D. Montée des eaux, îles, côtes

L'ensemble du globe sera touché par la montée du niveau de la mer. Des politiques d'adaptation seront nécessaires dans les endroits les plus vulnérables. On estime que de 100 à 200 millions de personnes pourraient être concernées par cette montée des eaux.

La montée des eaux impliquera des dizaines voire centaines de millions de dollars de dégâts chaque année. Les petites îles et les deltas seront fortement touchés : de fortes migrations sont à prévoir dans ces zones.

E. Sécurité alimentaire

Du fait des modifications des précipitations et des températures, la production agricole serait aussi impactée par une diminution des rendements. Cependant, la production sera favorisée dans certaines parties du monde où l'agriculture pouvait être difficile avant d'atteindre un réchauffement à +1,5°C. Par ailleurs, certaines zones actuellement propices seront défavorisées.

Un réchauffement global aura un impact significatif sur la quantité de bétail ainsi que sa qualité. En effet, une augmentation de la température modifie le cycle des animaux et donc potentiellement sa qualité. On estime que la baisse de production pourrait être de 8% pour un réchauffement de +1,5°C. Une augmentation du stress hydrique sera aussi constatée.

F. Santé humaine, effets directs température

Les données du rapport sont assez floues (peu de données médicales). Le rapport estime que les maladies pourraient se propager plus vite aux moyennes latitudes (différence de T°C et d'humidité)

Les saisons pourraient être allongées et avoir des impacts sur certaines régions du monde. En effet, des zones déjà vulnérables pourraient être soumises à du stress supplémentaire (hydrique par exemple)

G. Effets sur les zones urbaines

Si aucune mesure d'adaptation est prise, les **îlots de chaleurs**[22] autour des villes vont fortement augmenter, notamment pendant les canicules : les personnes vulnérables seront en danger (personnes âgées, enfants, etc.). Le risque serait encore plus important pour un scénario à +2°C. Le risque sera plus ou moins important en fonction de chaque ville et de leur stratégie d'adaptation. Les risques liés à la montée des eaux sur les zones urbaines sont également importants.

H. Impacts sur les secteurs économiques

Une baisse de l'attractivité touristique pourrait être constaté, notamment le tourisme lié à la barrière de corail et aux sports d'hiver.

Le secteur de l'énergie et des transports seraient aussi fortement impactés, notamment au Brésil et en Amérique du Nord. De nouvelles routes fluviales apparaîtront suite à la fonte d'une partie des glaces.

I. Impact sur les sociétés

Il sera nécessaire d'adapter les politiques nationales aux flux de migration afin de pouvoir apporter des solutions aux futurs grands déplacement des zones tropicales vers les zones sub tropicales : populations de déplacés multipliées par 3.

Les inégalités se vont se creuser aux niveaux international et national. Les populations les plus vulnérables seront celles situées en Afrique et en Asie du sud (et Asie de l'est à +2°C)

Les points de vigilance clairement mis en avant sont la disparition du massif coralien ; la submersion des îles et états insulaire et la sécurité alimentaire.

3.4 Impacts évités et réduction des risques à +1,5°C par rapport à +2°C

Pour son cinquième rapport (AR5), le GIEC a mis en place divers marqueurs du changement climatique :

- Menace sur les écosystèmes
- Météorologie
- Vulnérabilité des peuples
- Impacts financiers
- L'occurrence d'une vulnérabilité climatique

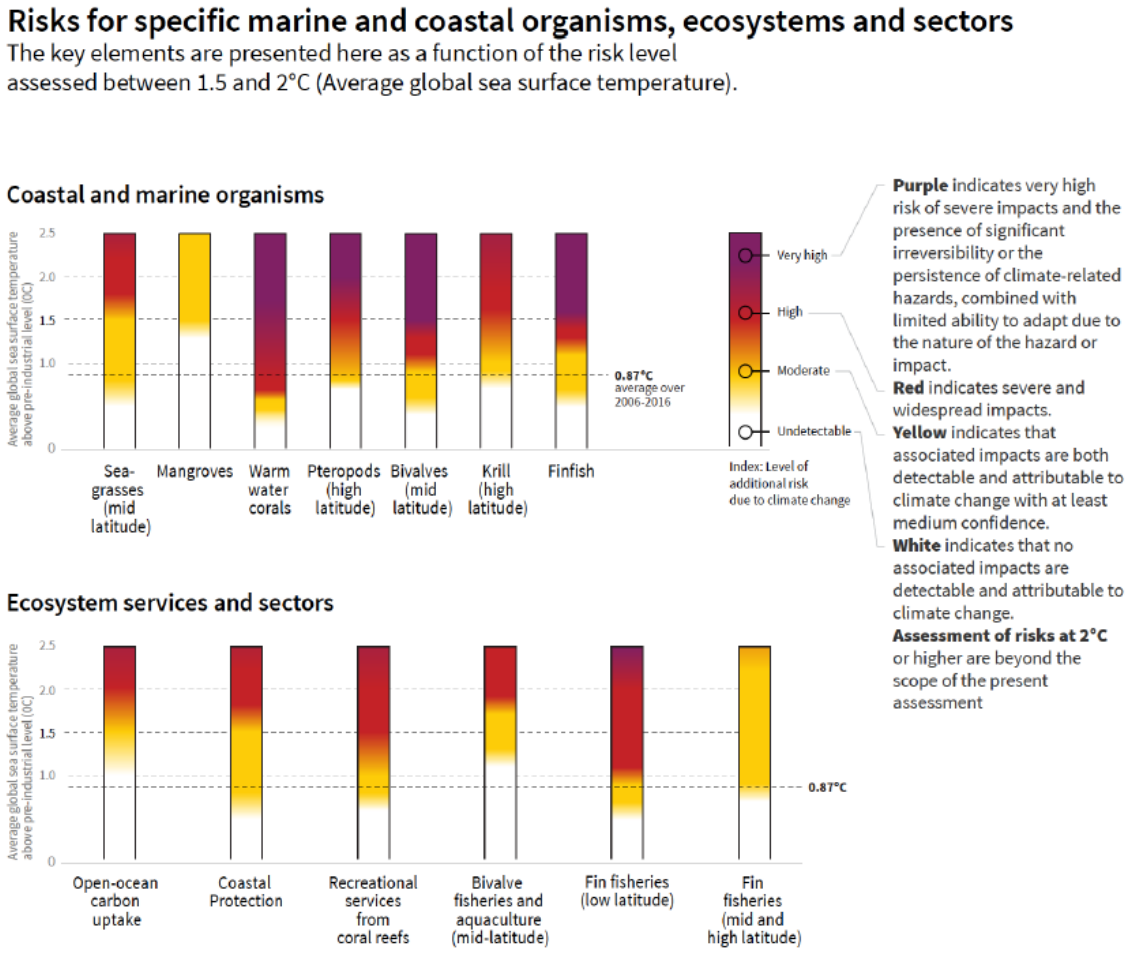
Pour chacun des marqueurs, l'évolution entre le dernier rapport du GIEC et ce présent rapport a été observée. Un code couleur a été créé afin de pouvoir évaluer les risques associés à un certain niveau de réchauffement:

- Blanc : Pas d'impact attribuable au réchauffement climatique

[22] **Îlots de chaleurs :** Zones urbaines dans laquelle la température est localement plus élevée que dans le reste de la ville

- Jaune : Impacts notables pouvant être raisonnablement attribués au réchauffement climatique
- Rouge : impacts sévères à l'échelle globale
- Violet : Impacts très sévères avec d'importantes irréversibilités ou une persistance des dangers liés au climats, associés à une faculté d'adaptation limitée.

Depuis le rapport n°5, tous les impacts ont vu leur code couleur se dégrader. Par ailleurs, des impacts jugés critiques, associés à un réchauffement de +3-4 °C, le sont maintenant pour un réchauffement de "seulement" +2°C.



Evolution des risques entre 1.5°C et 2°C pour les côtes et les mers

<u>Bénéfices économiques</u> : Le réchauffement climatique aura quelques impacts économiques bénéfiques. Par exemple, la toundra de Russie deviendrait fertile. Mais il impactera négativement l'économie dans la majeure partie du globe, à fortiori à +2°C. Par exemple, de grosses pertes sont estimés pour l'hémisphère sud.

<u>Points de non retours identifiés par zone et par évènement</u>. Les "points de non-retour" sont étudiés, notamment pour les scénarios avec dépassement. Il existe de gros facteurs d'incertitudes sur un emballement de la température à cause des boucles de rétroaction. Par exemple, le réchauffement

climatique implique la fonte de la banquise, cette dernière entretenant, voire même accélérant, le réchauffement.
Si un point de non-retour est atteint lors du dépassement, il n'est absolument pas sûr qu'il soit possible de redescendre à +1.5°C.

Afin de réduire les risques, il la captation de carbone sera nécessaire. Des exemples de solution pour la séquestration du carbone sont :

- Modifier l'albédo
- Afforestation (planter des forêts là où il n'y en a jamais eu) et reforestation

Avec l'actualisation des données, on observe une aggravation du constat sur les risques entre +1,5°C et +2°C :

- Probabilité renforcée pour les événements extrêmes
- Distribution d'impact: régions peuvent être soumises à des problèmes de sécurité alimentaires, stress hydrique etc.. Ces risques prévus entre +1.5 et +2.6 sont maintenant prévue entre +1.5 et +2
- Changement plus drastique pour la biodiversité. Le risque qui était auparavant jugé important à +3°C l'est maintenant entre 1.5 et 2.5°C.

IV - Renforcement et ajustement de la réponse globale

Cette partie traite des stratégies d'atténuation afin de réduire les émissions de GES et d'adaptation au changement climatique ainsi que leur évaluation et leur capacité à être implantée rapidement et à grande échelle, ce qui est une nécessité absolue.

Le rapport indique que les scénarios cohérents avec l'objectif de 1.5°C nécessitent une action immédiate, de grande ampleur et à l'échelle mondiale afin de parvenir à réduire les émissions nettes à zéro en 2050 au plus tard. Aussi, limiter le réchauffement à +1.5°C nécessitera moins de mesures d'adaptation qu'à +2°C.

Enfin, le rapport souligne bien que l'adaptation a des limites: tous les systèmes ne peuvent pas s'adapter et tous les impacts ne sont pas réversibles. Pour rappel, une stratégie d'adaptation passe tout d'abord par la réduction des émissions de CO_2.

4.1 Solutions de mitigation et d'adaptation

Plusieurs pistes de solution sont évoquées dans le rapport.

- **Technologie :** Meilleure implantation de technologies à basse émission/ sans émissions liées à l'énergie solaire, les vents onshore et offshore, le nucléaire, les biocarburants, ainsi que les améliorations dans la distribution et le stockage d'énergie (réseau électrique local, et batteries). Bien que de plus en plus performantes, la contribution des technologies à la réduction des GES est souvent surestimée au regard des statistiques historiques.

Dans le passé, la croissance économique dépendait directement de l'utilisation des énergies fossiles mais il a été constaté qu'en 2015 et en 2016 le lien était moins fort. Il convient donc de surveiller si cette tendance se vérifie.

- **Électrification** du transport et des industries

- **Réduction du changement d'utilisation des sols**

- **Réformer la finance** pour faciliter le financement de projets durables.

- **Adaptation des communautés rurales indigènes :** par exemple au Népal, des villages ne peuvent plus vivre de l'agriculture et de l'élevage, des magasins de thé et des hôtels y sont ouverts.

- **Nourriture :** développement des variétés de céréales, etc. qui sont adaptées au changement climatique, agriculture de conservation (pour l'amélioration des sols), intensification durable de l'agriculture, diminution de la consommation de viande, hybridation des animaux domestiques et sauvages pour les rendre plus résilients, vaccination du bétail pour qu'il émette moins de méthane, amélioration de l'efficacité de l'irrigation (rendue de plus en plus nécessaire par le Changement

Climatique), utilisation de variétés moins gourmandes en eau, agroforesterie, réduction du gaspillage alimentaire, utilisation d'OGM.

- **Ecosystèmes :** restauration des forêts et baisse de la déforestation, restauration et protection des zones humides, construction de digues sur les côtes, restauration de mangroves, restauration de massif coralien (pour le moment cette restauration s'avère impossible, d'où un besoin d'investir en modification génétique).

- **Villes durables et résilientes :** population en augmentation, et risques concentrés de canicule, inondations, nouvelles maladies, pollution de l'air, pénurie d'eau.
De possibles solutions sont : améliorer l'efficacité énergétique, implanter énergies renouvelables et réseaux électriques locaux, légiférer sur le secteur du bâtiment (construction et rénovation), technologies smart et IoT (Internet of Things), rendre les villes plus denses et compactes, améliorer les transports en commun et les espaces piétons, planter arbres et créer surfaces perméables, mieux gérer l'eau potable et l'assainissement.

- **Avions et bateaux de fret :** biocarburants et électrification des ports.

- **Industries :** efficacité énergétique, recyclage, utilisation de matériaux à plus faible énergie grise, production d'énergie par biomasse, électrification grâce à l'hydrogène, CSC.

- **Réduction de la demande en électricité**, ce qui implique une amélioration en efficacité des industries, mais aussi changements dans les modes de vie.

- **Réduction des gaz à effet de serre de courte durée (SCLF) :** méthane, monoxyde de carbone, noir de carbone, etc. Mais en général la baisse de ces émissions est liée à celle de CO_2. Problème si on réduit trop les émissions d'aérosols, qui refroidissent le climat.

- **Autres possibilités d'adaptation :** mieux comprendre les risques grâce à la recherche et s'y préparer, modifier les systèmes d'assurance afin de répartir les risques liés au climat, éducation, améliorer l'hygiène et la santé, utiliser des connaissances de populations indigènes, migrations humaines (très mal accepté politiquement), améliorer les prédictions des modèles climatiques.

Le rapport souligne le besoin d'action intergouvernementale, nécessaire d'une part pour que les choses avancent, mais aussi pour que les solutions apportées ne se fassent pas au détriment d'autres pays, notamment des pays en développement. Il faut veiller à ne pas simplement décaler les impacts sur les populations les plus pauvres.

Un souci majeur est que la plupart des technologies décrites dans le rapport en sont encore au stade de recherche et développement, ce qui est en décalage avec le besoin urgent de les massifier. Les solutions qui ont le plus de chances d'être implantées sont souvent celles qui apportent des co-bénéfices importants, tels que l'amélioration de la qualité de l'air, ou un accès plus fiable à l'électricité dans les pays en développement. Il est nécessaire d'incorporer le changement climatique dès la conception des systèmes (électriques, transports en commun, l'approvisionnement d'eau, etc.), afin de les rendre les plus résilients possibles. Bon nombre de solutions possibles engendrent une

concurrence dans l'usage du sol, par exemple entre l'agriculture, la plantation de forêts, et la production de biocarburants. Il y a également des contraintes liées à l'éthique et à l'acceptation sociale, et il faut toujours garder à l'esprit les effets secondaires engendrés par les solutions proposées.

4.2 Solutions de géo-ingénierie

Le rapport s'abstient d'utiliser le terme de géo-ingénierie. Ce type de technologie est toutefois envisagé car il est nécessaire d'avoir un bilan carbone négatif d'ici quelques décennies. Les voici :

- **Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)[23]:** de la biomasse est brûlée et le CO_2 est récupéré à la sortie des cheminées. Il est ensuite stocké dans le sol. Un test à échelle réelle est en cours. L'inconvénient principal qui en ressort est que la quantité de terres arables utilisées est importante.

- **Afforestation et reforestation (AR):** Des forêts sont plantées ou replantées. La reforestation a de multiples bénéfices. L'afforestation peut avoir des impacts négatifs sur la biodiversité et les ressources en eau si un territoire diversifié est transformé en monoculture d'arbres, en particulier si l'espèce introduite est invasive. Les autres inconvénients sont le besoin important de terres arables (plus que le BECCS) ainsi que la saturation des forêts au bout de quelques décennies.

- **Soil carbon sequestration and biochar[24]:** l'agriculture pour la conservation du carbone marche bien mais son stockage est limité. La production de **biochar[25]** à grande échelle nécessite beaucoup de terres arables.

- **Enhanced Weathering (EW) and Ocean Alkalinisation[26]**: des roches sont minées, broyées, notamment en utilisant l'énergie des vagues, puis réparties soit sur la terre soit directement dans l'océan, afin d'augmenter la capacité de stockage de CO_2 des eaux maritimes. Cependant cette technologie est chère et très gourmande en énergie. Elle a en plus des effets secondaires : augmentation du pH de l'eau, relâchement de métaux lourds, impacts sur la santé si petites particules et relâchement de nutriments qui peuvent déstabiliser les milieux naturels.

- **Direct Air Carbon Dioxyde Capture and Storage (DACCS)[27]:** théoriquement cette solution est parfaite car elle ne nécessite pas de grandes surfaces de terre. Cependant la technologie est très immature. De plus, la consommation en énergie est beaucoup plus importante que pour la CSC à la sortie des cheminées car le CO_2 est beaucoup moins concentré.

---

[23] Bioénergie avec capture et stockage de carbone

[24] Séquestration du carbone dans le sol et production de biochar (voir [25])

[25] B**iochar:** obtenu par pyrolyse de biomasse végétale (chauffage à environ 500°C en l'absence d'oxygène). Le biochar se présente sous forme de petits fragments noirs, légers et poreux qui peuvent être insérés dans le sol

[26] Altération forcée et alcalinisation des océans

[27] Capture directe et stockage du dioxyde de carbone dans l'air

- **Ocean Fertilisation:** consiste à ajouter des nutriments (fer, nitrogène, phosphore) dans l'océan afin qu'il capte davantage de carbone en surface, carbone qui sera ensuite séquestré en profondeur. Cette technologie a des effets secondaires sur la biodiversité.

- **Solar Radiation Modification (SRM)[28]:** injection d'aérosols dans la stratosphère, afin de refroidir le climat. Cette technique doit être utilisée en continu car il y a des risques d'effets de choc si elle est arrêtée subitement. Socialement peu accepté, la SRM détruit la couche d'ozone ce qui impacte la santé. De plus, des problèmes de gouvernance apparaître car la SRM peut avoir des impacts positifs pour un pays mais négatifs pour un autre.

D'autres solutions semblables sont moins étudiées : modifier les propriétés des nuages, ou couvrir les déserts et glaciers de bâches réfléchissantes. Les SRM sont potentiellement à utiliser en conjonction des CDR (Carbon Dioxide Removal), pendant quelques décennies dans les scénarios qui franchissent temporairement la barre des 1.5°C.

4.3 Mise en œuvre de changements rapides et ambitieux

Système de gouvernance multi-échelle

Les institutions, en tant que détentrices des normes et règles, ont un rôle important à jouer dans un monde à +1,5°C. Elles doivent mettre en place les régulations permettant l'application des politiques assurant l'équité, la justice, le développement durable ainsi que la diminution de la pauvreté.

Les traités internationaux, les conventions ainsi que les organisations internationales permettent de renforcer la mise en place de ces politiques. L'accord de Paris faisant suite à la COP21 offre un changement de paradigme. En effet, alors que les précédents traités (Kyoto, Montréal) étaient centrés sur le climat sans prendre en compte l'aspect du développement et qu'ils occasionnaient des rivalités entre pays, notamment au niveau de la distribution des quotas d'émissions, l'accord de Paris est basé sur un système de "pledge and review" (engagement et bilan) qui aurait une meilleure efficacité en termes de résultats. Les Etats sont ainsi libres des politiques à mettre en place pour atteindre les objectifs fixés.

Les structures sub-nationales (gouvernements locaux, communautés, associations) ont quant à elles la mission de réconcilier les préoccupations locales et les objectifs globaux. Les gouvernements locaux ont le pouvoir d'influencer les stratégies d'adaptation et d'atténuation tandis que les associations et les communautés peuvent encourager et engager des initiatives collectives et autonomes.

Chacun des niveaux de gouvernance a donc un rôle à jouer dans les différents scénarios du GIEC. Cependant la réussite de ces derniers nécessite des interactions fortes entre ces niveaux. Chaque projet politique nécessite un plan d'action décrivant les politiques et les mesures nécessaires, les moyens humains et financiers, des étapes clés définies ainsi qu'un système de vérification de l'efficacité de l'action. La mise en place de ce plan d'action avec toutes les parties prenantes, notamment les citoyens et les minorités particulièrement concernées, augmente les chances de réussite du projet.

[28] Modification du rayonnement solaire

Renforcement des capacités institutionnelles

Les institutions jouent donc un rôle primordial dans le rapport du GIEC. Il est donc nécessaire de renforcer leurs capacités, notamment dans les pays en développement.

Il faut tout d'abord des politiques stables avec un cadre réglementaire fort et donc des institutions judiciaires, de collectes de taxes et de vérification du code du bâtiment compétentes. L'accès aux connaissances de base et la disponibilité des ressources doivent être élémentaires. Les institutions ont tout intérêt, afin d'améliorer leurs capacités, à s'appuyer sur des savoirs acquis et existants, tels que les connaissances des communautés ainsi que les connaissances dites indigènes. Un transfert des savoirs efficaces doit donc être mis en place pour assurer l'efficience des stratégies d'adaptation et d'atténuation.

Un autre aspect primordial dans la réussite des actions envisagées est la création d'institutions indépendantes pour le suivi, la surveillance et l'analyse des actions engagées et de leurs conséquences.

De même, les institutions financières doivent s'engager pour garantir une augmentation importante du volume d'investissement vers les énergies bas carbone (besoins estimés à 3 000 milliards de dollars d'ici 2050). Il y a donc besoin d'actions conjointes d'institutions financières publiques et privées afin de parvenir à cet objectif.

Rendre possible un changement des comportements et des styles de vie

L'être humain étant au centre du changement climatique via son action anthropique, une diminution des GES n'est possible que par un changement radical de son comportement. Le tableau 4.3 en annexe montre les différents comportements pertinents pour la réussite d'un scénario à +1,5°C.

Divers facteurs pouvant influencer la capacité des populations à agir existent. Ainsi, la capacité des populations à entreprendre des actions pour le climat dépend de leur niveau de revenu. Les personnes ayant un bas revenu auront plus de difficultés à s'engager tandis que les personnes avec des hauts revenus auront tendance à avoir une consommation accrue, entraînant une augmentation de leurs émissions de CO_2. Par ailleurs, la connaissance est aussi un facteur essentiel puisqu'une mauvaise compréhension des causes et des conséquences du réchauffement climatique pourrait avoir un effet inhibiteur sur une démarche d'engagement. Dans ce sens, le rôle des médias est important afin d'informer la population. En outre, l'expérience directe des conséquences du changement climatique, propre à chacun, peut être un facteur fort d'engagement (exemple des populations confrontées aux inondations).

La motivation de l'individu à s'engager provient de différents éléments comme les valeurs, l'idéologie à laquelle il adhère ainsi que sa vision du monde tandis que le niveau de connaissances semble avoir un impact moins important. Ainsi une vision libérale et capitaliste du monde aurait tendance à engendrer des convictions moindres par rapport aux changements climatiques. Par ailleurs, dans ce cadre de pensée, un individu va avoir tendance à favoriser les actions qui n'entachent pas son confort de vie. C'est pourquoi des techniques d'augmentation de l'efficacité énergétique sont souvent privilégiées par les particuliers par rapport à une diminution de la consommation d'énergie.

Enfin l'aspect social est primordial, que ce soit le jugement par les pairs, la motivation par la reproduction des actions de l'entourage et du plus grand nombre, la réputation de l'individu et l'accord des actions pour l'environnement avec l'idée que l'individu se fait de lui-même. Les gens auront plus tendance à reproduire une action pour l'environnement si elle leur aura produit des émotions positives.

D'autres phénomènes peuvent diminuer la motivation et la capacité des individus à s'engager tels que les habitudes, qui sont souvent difficiles à modifier, et les **biais cognitifs**[29]. Ainsi certaines personnes pensent que la lumière consomme plus d'énergie que le chauffage de leur eau car la lumière est visible.

Pour remédier à cela, il faut des stratégies politiques fortes, des campagnes d'information et des incitations financières. Ainsi, on peut citer l'exemple de la ville de Stockholm et la mise en place d'un péage urbain en 2007. Malgré des détracteurs lors de l'annonce du projet, les retours sont positifs après l'essai car la mise en place de ce péage a été accompagnée d'une campagne d'information forte et de l'amélioration de l'accès aux transports et aux parkings à l'entrée de la ville. De ce fait, le trafic a été réduit de 20% et les émissions de CO_2 de 2 à 3%. Concernant les campagnes d'information, il convient de favoriser des messages qui, bien que difficiles à accepter pour les populations, proposent des solutions/alternatives et tenant compte du contexte et des populations locales à la place de propos uniquement alarmistes. Par ailleurs, des politiques jugées "punitives" peuvent être acceptées si elles sont perçues comme favorisant l'intérêt général et si elle s'applique à tous. En outre, la technologie peut jouer un rôle positif dans la lutte contre le changement climatique. Cependant, les pouvoirs politiques doivent encadrer les innovations afin de lutter contre le mécanisme d'**effet rebond**[30]. En Annexe 3 se trouve les indicateurs de faisabilité des options d'adaptation et d'atténuation.

Pour finir les problèmes importants qu'il faut tenter de gérer sont :

- Les migrations humaines qui vont s'intensifier
- Changer les institutions. En termes de changement climatiques, ce sont les institutions notamment économiques qui posent problème, plus que la politique.
- Standardiser les approches pour le suivi et l'évaluation dans les différents pays
- Encourager une synergie forte entre adaptation et atténuation. Exemple de non synergie: densification urbaine peut réduire l'émission de GES, mais augmente les ilots de chaleur ; agrosylviculture réduit les GES, mais réduit aussi le potentiel de piégeage du carbone comparé aux forêts primaires
- Les connaissances manquantes : manque de littérature sur les coûts, sur l'énergie. Encore beaucoup de recherche à fournir.

[29] **Biais cognitifs :** Forme de pensée qui met en place des distorsions dans le traitement de l'information. Ainsi, le cerveau interprète notre environnement en le simplifiant et en faisant appel à des stéréotypes et des préjugés.

[30] **Effet rebond :** Une innovation visant une gestion plus efficace d'une ressource en en réduisant la consommation entraîne généralement une augmentation plus ou moins importante de sa consommation (définition du site *quelfutur.org*)

Conclusion

Les conséquences d'un réchauffement de 1°C sont déjà observées concrètement. Stopper le réchauffement climatique à 1,5°C au lieu de 2 aurait déjà des conséquences positives (niveau de la mer, fonte des glaces, vie des récifs). Limiter le réchauffement permet aux écosystèmes et aux sociétés de s'adapter sans dépasser un seuil de risque. « Outre les avantages évidents pour les populations et les écosystèmes naturels, le fait de limiter le réchauffement à 1,5 °C et non à 2 °C permettrait également de faire en sorte que la société soit plus durable et plus équitable », a précisé le GIEC.

Limiter l'augmentation à 1,5°C nécessite des transitions rapides et de grande envergure, dans les domaines de l'aménagement du territoire, de l'énergie, de l'industrie, du bâtiment, du transport et de l'urbanisme. Mais cela reste possible du point de vue des lois de la chimie et de la physique. Certaines des mesures-clés pour limiter le réchauffement sont déjà mises en œuvre, mais il faut augmenter le rythme.

Une augmentation supérieure à 1,5°C impliquerait une plus grande dépendance vis-à-vis des techniques d'élimination du CO_2 atmosphérique si l'on souhaite ensuite revenir en dessous des 1,5°C en 2100. Ces techniques sont mal maîtrisées et pourraient avoir des effets indésirables.

Annexes

Annexe 1: Contexte du Rapport

Le Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C a été approuvé le samedi 06/10/2018 par le GIEC à Incheon, en République de Corée. Il sera utilisé lors de de la Conférence sur les changements climatiques qui se tient dans la ville polonaise de Katowice en décembre 2018 et lors de laquelle les gouvernements feront le point sur l'Accord de Paris.

Le rapport est l'œuvre de 91 auteurs et éditeurs-réviseurs, de 40 pays. Il a été commandé par les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) lors de l'adoption de l'Accord de Paris. Il présente aux décideurs et aux professionnels les informations dont ils ont besoin pour prendre des décisions relatives aux changements climatiques en tenant compte des spécificités locales et des besoins des populations. Le rapport Réchauffement planétaire de 1,5°C est le premier d'une série de rapports spéciaux qui seront élaborés par le GIEC dans le cadre de son sixième cycle d'évaluation.

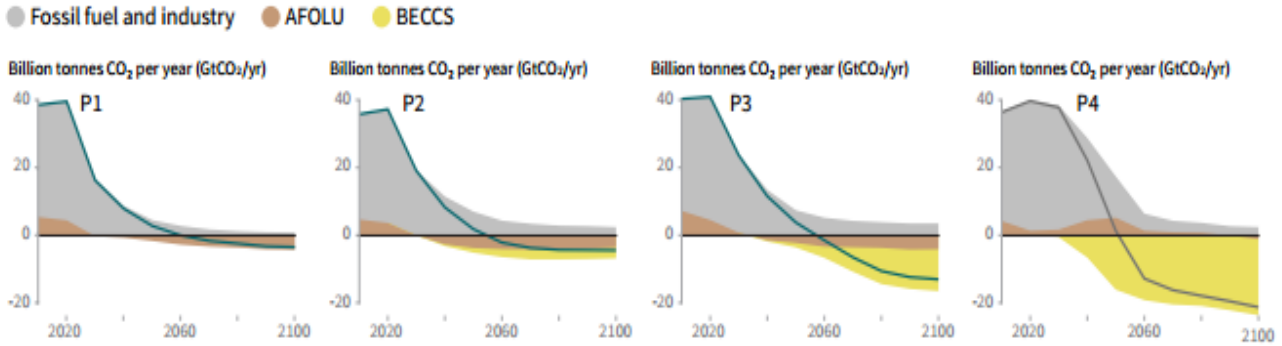
Annexe 2: Les scénarios

Ci-dessous la figure de synthèse (issue du résumé pour décideurs) qui présente 4 trajectoire cohérente avec l'objectif 1,5°C, avec les évolutions d'émissions associées, et pour 4 situations socio-économiques distinctes.

Characteristics of four illustrative model pathways

Different mitigation strategies can achieve the net emissions reductions that would be required to follow a pathway that limit global warming to 1.5°C with no or limited overshoot. All pathways use Carbon Dioxide Removal (CDR), but the amount varies across pathways, as do the relative contributions of Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) and removals in the Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector. This has implications for the emissions and several other pathway characteristics.

Breakdown of contributions to global net CO_2 emissions in four illustrative model pathways



P1: A scenario in which social, business, and technological innovations result in lower energy demand up to 2050 while living standards rise, especially in the global South. A down-sized energy system enables rapid decarbonisation of energy supply. Afforestation is the only CDR option considered; neither fossil fuels with CCS nor BECCS are used.

P2: A scenario with a broad focus on sustainability including energy intensity, human development, economic convergence and international cooperation, as well as shifts towards sustainable and healthy consumption patterns, low-carbon technology innovation, and well-managed land systems with limited societal acceptability for BECCS.

P3: A middle-of-the-road scenario in which societal as well as technological development follows historical patterns. Emissions reductions are mainly achieved by changing the way in which energy and products are produced, and to a lesser degree by reductions in demand.

P4: A resource and energy-intensive scenario in which economic growth and globalization lead to widespread adoption of greenhouse-gas intensive lifestyles, including high demand for transportation fuels and livestock products. Emissions reductions are mainly achieved through technological means, making strong use of CDR through the deployment of BECCS.

Annexe 3: Indicateurs de faisabilité des options d'adaptation et d'atténuation

Les différentes dimensions de la faisabilité utilisées par le GIEC pour évaluer les mesures qu'il préconise sont détaillées dans le tableau suivant :

	Characteristics	Adaptation indicators	Mitigation indicators
	Economic	Micro-economic viability Macro-economic viability Socio-economic vulnerability reduction potential Employment & productivity enhancement potential	Cost-effectiveness Absence of distributional effects Employment & productivity enhancement potential
	Technological	Technical resource availability Risks mitigation potential	Technical scalability Maturity Simplicity Absence of risk
	Institutional	Political acceptability Legal & regulatory feasibility Institutional capacity & administrative feasibility Transparency & accountability potential	Political acceptability Legal & administrative feasibility Institutional capacity Transparency & accountability potential
	Socio-cultural	Social co-benefits (health, education) Socio-cultural acceptability Social & regional inclusiveness Intergenerational equity	Social co-benefits (health, education) Public acceptance Social & regional inclusiveness Intergenerational equity Human capabilities
	Environmental/ecological	Ecological capacity Adaptive capacity/ resilience building potential	Reduction of air pollution Reduction of toxic waste Reduction of water use Improved biodiversity
	Geophysical	Physical feasibility Land use change enhancement potential Hazard risk reduction potential	Physical feasibility (physical potentials) Limited use of land Limited use of scarce (geo)physical resources Global spread

La faisabilité des différentes mesures peut être évaluée en fonction de tous ces critères.
Plus la case est foncée, plus la littérature tend à montrer que la faisabilité d'une mesure selon le critère considéré est bonne. Les figures ci-dessous donnent un aperçu de ce qu'il en est pour différent types de mesures.

Légende :
Case foncée : absence de barrières
Case moyennement foncée : pas d'impact positif ni négatif
Case pâle : Barrières potentiellement bloquantes
Blanc : pas de littérature suffisante

Mitigation

System	Mitigation option	Evidence	Agreement	Ec	Tec	Inst	Soc	Env	Geo	Context
Energy system transitions	Wind energy (on-shore & off-shore)	Robust	Medium							Wind regime, economic status, space for windfarms and enhanced by legal framework for independent power producers affect uptake; cost-effectiveness affected by incentive regime.
	Solar PV	Robust	High							Cost-effectiveness affected by solar irradiation and incentive regime. Also enhanced by legal framework for independent power producers affect uptake.
	Bioenergy	Robust	Medium							Depends on availability of biomass and land and capability to manage sustainable land use. Distributional effects depend on the agrarian (or other) system used to produce feedstock.
	Electricity storage	Robust	High							Batteries universal but grid flexible resources vary with area's level of development
	Power sector CCS	Robust	High							Varies with local CO2 storage capacity, presence of legal framework, level of development and quality of public engagement
	Nuclear energy	Robust	High							Electricity market organisation, legal framework, standardisation & know-how, country's 'democratic fabric', institutional and technical capacity, and safety culture of public and private institutions
Land & ecosystem transitions	Reduced food wastage & efficient food production	Robust	High							Will depend on the combination of individual and institutional behaviour
	Dietary shifts	Medium	High							Depends on individual behaviour, education, cultural factors and institutional support
	Sustainable intensification of agriculture	Medium	High							Depends on development and deployment of new technologies
	Ecosystems restoration	Medium	High							Depends on location and institutional factors
Urban	Land-use & urban planning	Robust	Medium							Varies with urban fabric, not geography or economy; requires capacitated local government and legitimate tenure system

	Electric cars and buses	Medium	High							Varies with degree of government intervention; requires capacity to retrofit "fuelling" stations
	Sharing schemes	Limited	Medium							Historic schemes universal new ones depend on ICT status; undermined by high crime and low levels of law enforcement
	Public transport	Robust	Medium							Depends on presence of existing 'informal' taxi systems, which may be more cost effective and affordable than capital intensive new build schemes, as well as (local) government capabilities
	Non-motorised transport	Robust	High							Viability rests on linkages with public transport, cultural factors, climate and geography
	Aviation & shipping	Medium	Medium							Varies with technology, governance and accountability
	Smart Grids	Medium	Medium							Varies with economic status and presence or quality of existing grid
	Efficient appliances	Medium	High							Adoption varies with economic status and policy framework
	Low/zero-energy buildings	Medium	High							Depends on size of existing building stock and growth of building stock
Industrial system transitions	Energy efficiency	Robust	High							Potentials and adoption depends on existing efficiency, energy prices and interest rates, as well as government incentives.
	Bio-based & circularity	Medium	Medium							Faces barriers in terms of pressure on natural resources and biodiversity. Product substitution depends on market organisation and government incentivisation.
	Electrification & hydrogen	Medium	High							Depends on availability of large-scale, cheap, emission-free electricity (electrification, hydrogen) or CO2 storage nearby (hydrogen). Manufacturers' appetite to embrace disruptive innovations
	Industrial CCUS	Robust	High							High concentration of CO2 in exhaust gas improve economic and technical feasibility of CCUS in industry. CO2 storage or reuse possibilities.
Carbon dioxide removal	BECCS	Robust	Medium							Depends on biomass availability, CO2 storage capacity, legal framework, economic status and social acceptance
	DACCS	Medium	Medium							Depends on CO2-free energy, CO2 storage capacity, legal framework, economic status and social acceptance
	Afforestation & reforestation	Robust	High							Depends on location, mode of implementation, and economic and institutional factors

Adaptation

System	Adaptation option	Evidence	Agreement	Ec	Tec	Inst	Soc	Env	Geo	Context
Energy system transitions	Power infrastructure, including water	Medium	High							Depends on existing power infrastructure, all generation sources and with intensive water requirements
Land & ecosystem transitions	Conservation agriculture	Medium	Medium							Depends on irrigated/rainfed system, ecosystem characteristics, crop type, other farming practices
	Efficient irrigation	Medium	Medium							Depends on agricultural system, technology used, regional institutional and biophysical context
	Efficient livestock	Limited	High							Dependent on livestock breeds, feed practices,and biophysical context (e.g. carrying capacity)
	Agroforestry	Medium	High							Depends on knowledge, financial support, and market conditions
	Community-based adaptation	Medium	High							Focus on rural areas and combined with ecosystems-based adaptation, does not include urban settings
	Ecosystem restoration & avoided deforestation	Robust	Medium							Mostly focused on existing and evaluated REDD+ projects
	Biodiversity management	Medium	Medium							Focus on hotspots of biodiversity vulnerability and high connectivity
	Coastal defense & hardening	Robust	Medium							Depends on locations that require it as a first adaptation option
	Sustainable aquaculture	Limited	Medium							Depends on locations at risk and socio-cultural context
Urban & infrastructure system transitions	Sustainable land-use & urban planning	Medium	Medium							Depends on nature of planning systems and enforcement mechanisms
	Sustainable water management	Robust	Medium							Balancing sustainable water supply and rising demand especially in low-income countries
	Green infrastructure & ecosystem services	Medium	High							Depends on reconciliation of urban development with green infrastructure

Do Not Cite, Quote or Distribute

	Building codes & standards	Limited	Medium							Adoption requires legal, educational, and enforcement mechanisms to regulate buildings
Industrial system transitions	Intensive industry infrastructure resilience and water management	Limited	High							Depends on intensive industry, existing infrastructure and using or requiring high demand of water
Overarching adaptation options	Disaster risk management	Medium	High							Requires institutional, technical, and financial capacity in frontline agencies and government
	Risk spreading and sharing	Medium	Medium							Requires well developed financial structures and public understanding
	Climate services	Medium	High							Depends on climate information availability and usability, local infrastructure and institutions, national priorities
	Indigenous knowledge	Medium	High							Dependent on recognition of Indigenous rights, laws, and governance systems
	Education and learning	Medium	High							Existing education system, funding
	Population health and health system	Medium	High							Requires basic health services and infrastructure
	Social safety nets	Medium	Medium							Type and mechanism of safety net, political priorities, institutional transparency
	Human migration	Medium	Low							Hazard exposure, political and socio-cultural acceptability (in destination), migrant skills and social networks