6ème rapport d'évaluation du GIEC[1] (2021) (6th Assessment Report from IPCC)[2]

L'objet du GIEC est de recenser, analyser les études de chercheurs sur les évolutions du climat et d'en publier des rapports de synthèse.

[1] GIEC = Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

[2] IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change.

1 Interactions entre climat, écosystèmes et société

1. 1 Les groupes du GIEC

Le GIEC s'est scindé en 3 groupes, qui traitent respectivement des 3 sujets :

- ⇨ Les causes et efftes géophysiques du changement climatique ;
- ⇨ Les destructions et la résilience des écosystèmes dus à ce changement et les effets sur nos conditions de vie ;
- ⇨ Les aménagements possibles de notre vie sociétal pour minimiser l'effet de serre causant le changement climatique.

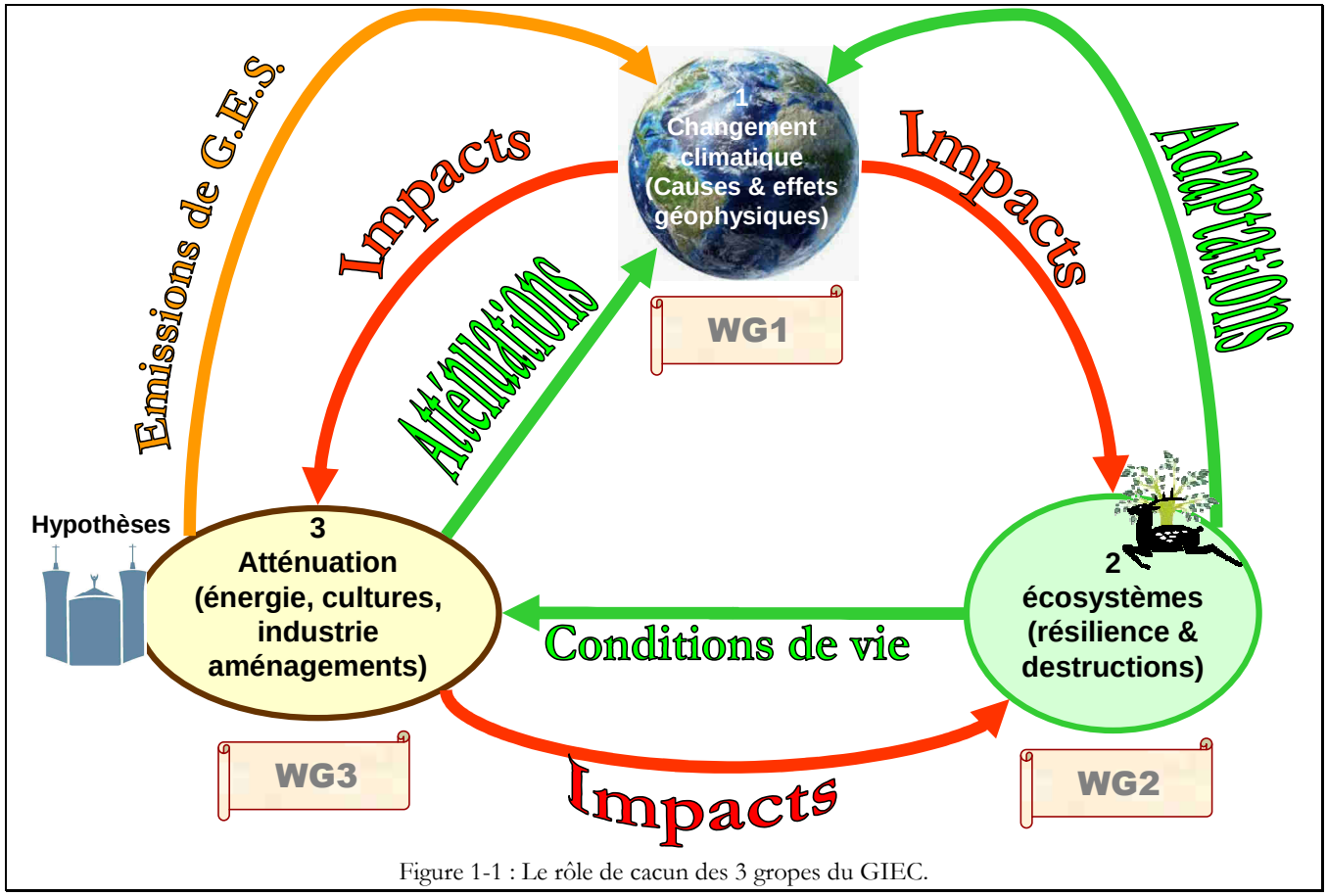


Figure 1-1 : Le rôle de cacun des 3 gropes du GIEC.

Les rapports consensuels du GIEC sont édités en moyenne tous les 7 ans, avec éventuellement des rapports intermédiaires plus spécialisés. Le dernier rapport, en cours d'agrément date de 2021. Chaque rapport de synthèse, se compose de 3 parties écrites par charque groupe de travail. Leur volume va croissant, tant par le contenu que par le nombre de références.

1. 2 Contenu du 6ème rapport

La Figure 1-3 schématise les sujets essentiels étudiés par chaque groupe et les liens entre ces sujets.

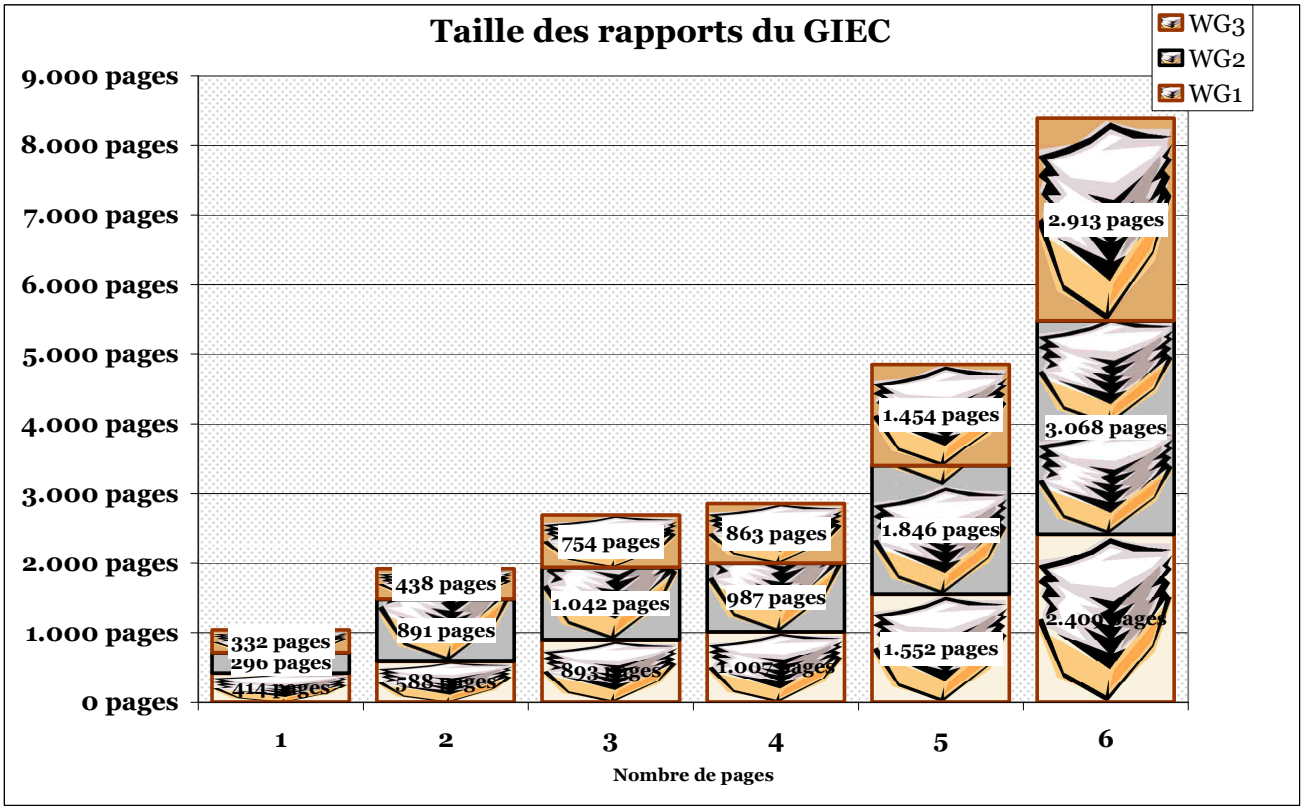


Figure 1-2 La série des rapports du GIEC.

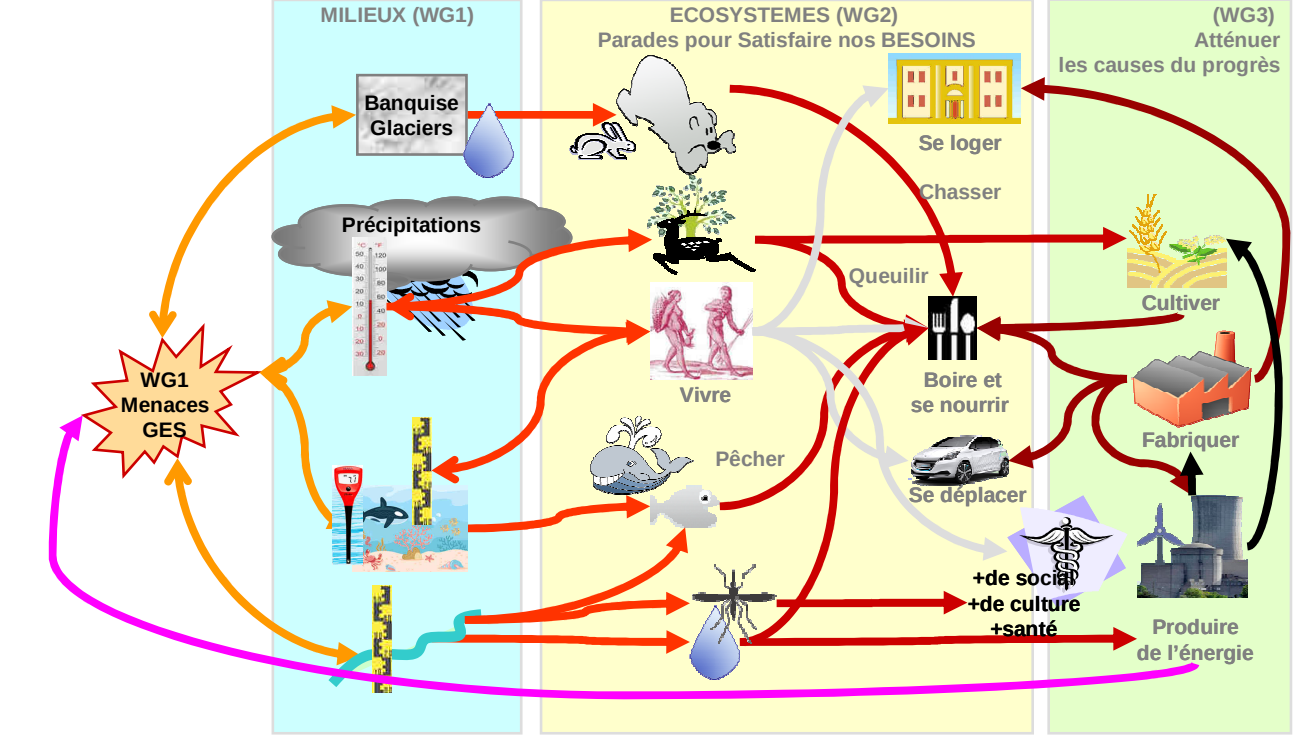


Figure 1-3 (Schéma R Joumard)

Il présente les résultats des simulations globale et régionales, selon diverses hypothèses **(***2058 pages)* :

- ⇨ sociales,
- ⇨ d'adaptation,
- ⇨ d'évolution de l'environnement.

Groupe 2 : Adaptation des écosystèmes au changement climatique (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/)

3069pages :

⇨ variations des conditions de vie pour la flore, de la faune et pour l'homme,

⇨ situations critiques, propositions de parades pour une meilleure résilience, selon les régions.

⇨ variations régionales.

Groupe 3 : Les solutions d'atténuation du changement climatique *2913 pages*:

⇨ Diminution des émissions, solutions énergétiques,

⇨ absorption GES,

⇨ décroissance…

Au total :le rapport fait : 8040 pages. Nous n'en présenterons donc qu'un aperçu et une analyse globale.

Cependant, au préalable, il est important de rappeler et 'expliquer le phénommène essentiel de l'effet desserre et l'ensemble des phénomènes qui influence le climat, comme le fait d'ailleurs le rapport du GIEC.

2 Les causes du changement climatique

Nous présentons :

- ⇨ Les causes du réchauffement (l'effet de serre) ;
- ⇨ L'utilisation des leçons du passé pour quantifier les effets ;
- ⇨ La nécessité de recourir aux modélisations pour prévoir l'avenir ;
- ⇨ Les paramètres fondamentaux qui influencent les résultats.

2. 1 Les causes du réchauffement (l'effet de serre)

Quelques explications préliminaires sont nécessaires ;

- ⇨ Le principe de l'effet de serre modélisé ;
- ⇨ La modélisation du cycle du carbone ;
- ⇨ L'évolution des modélisations.

2. 1. 1. Le principe de l'effet de serre

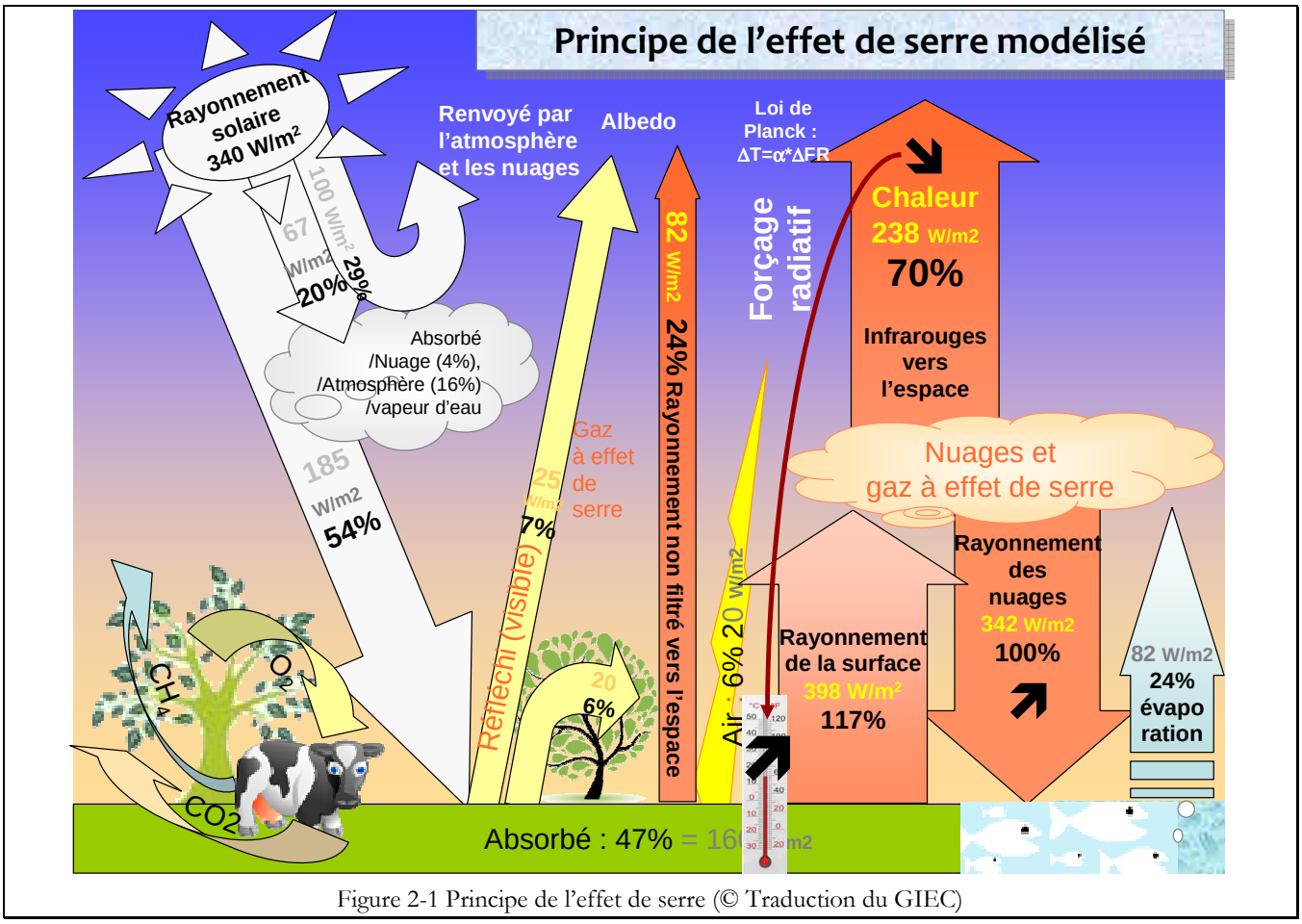
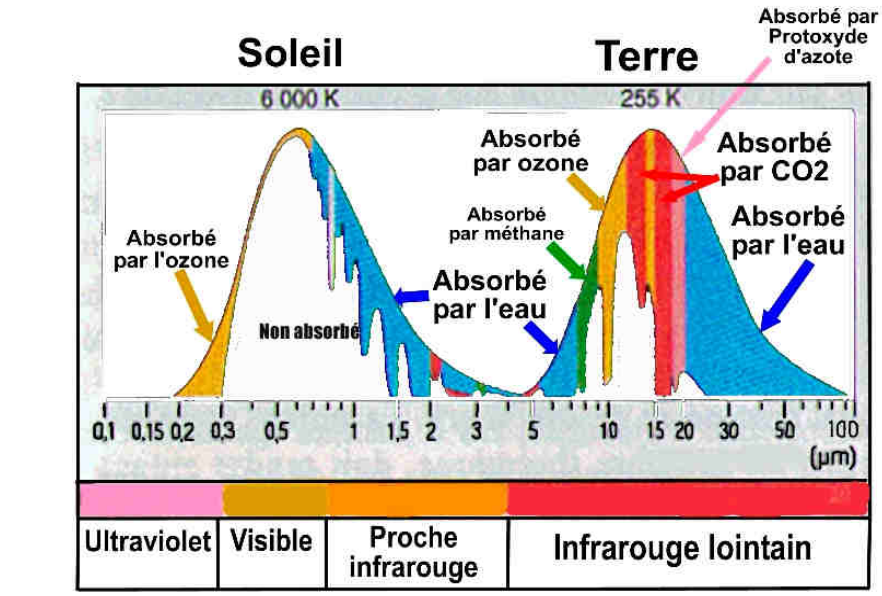


Figure 2-1 Principe de l'effet de serre (© Traduction du GIEC)

Les rayons reçus sont partiellement absorbés : Les ultra-violets par l'O_3[i] et les infra rouges (IR) par la vapeur d'eau.

Les rayons IR réfléchis sont absorbés selon leur fréquence par le CO_2[ii], le CH_4[iii], l'O_3, l'eau et quasi totalement par le N_2O[iv]. La Figure 2-2 présente les raies d'abortion des rayons reçus du soleil et des rayons émis par la terre, qui sont à l'origine de l'effet de serre. On notre que le protoxyde d'azote élimine déjà complètement certaines fréquences.



Sources : Sadourny, Jancovici

Figure 2-2 : Absorption des rayonnement reçus et renvoyés, selon leur longueur d'onde

La Figure 2-3 donne la contribution à l'effet de serre de chaque type de G.E.S.

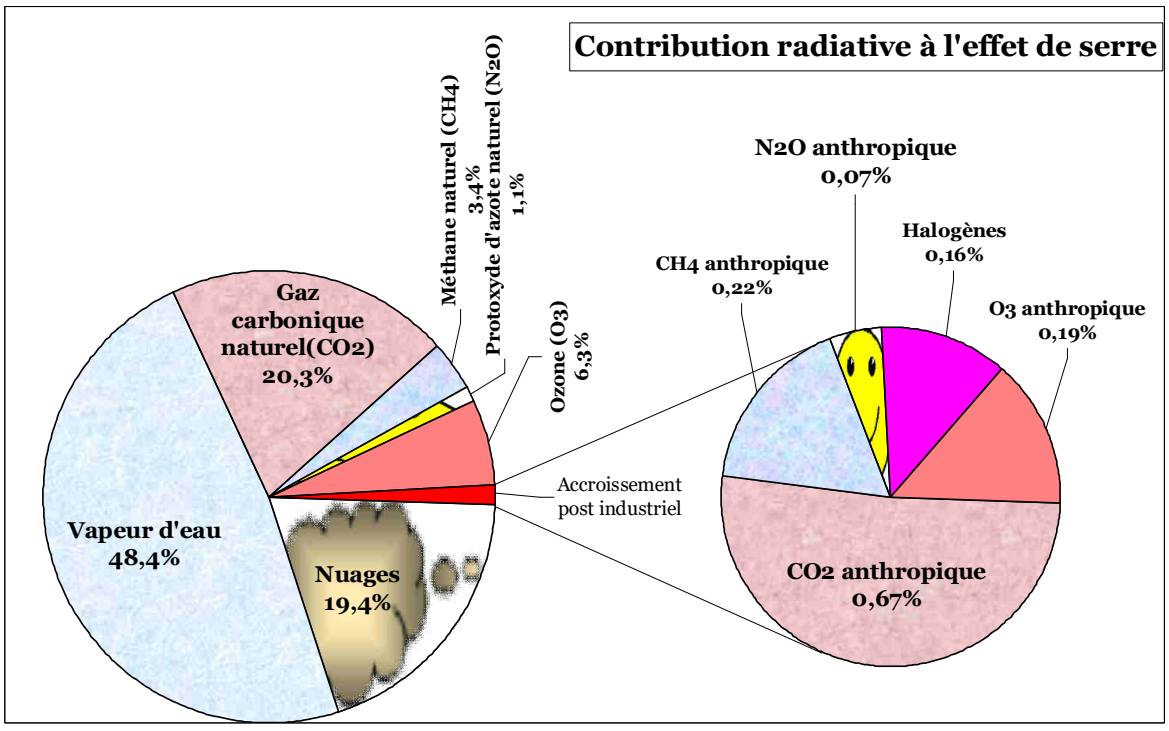


Figure 2-3 : Contribution à l'effet de serre de chaque type de gaz

2. 1. 2. L'origine des gaz à effet de serre

Le CO_2 est essentiellement émis par les **combustions**, mais pas seulement. Il est aussi générés par des réactions chimiques industrielles, comme la décomposition du calcaire (carbonate de calcium) pour fabriquer de la chaux qui compose le ciment.

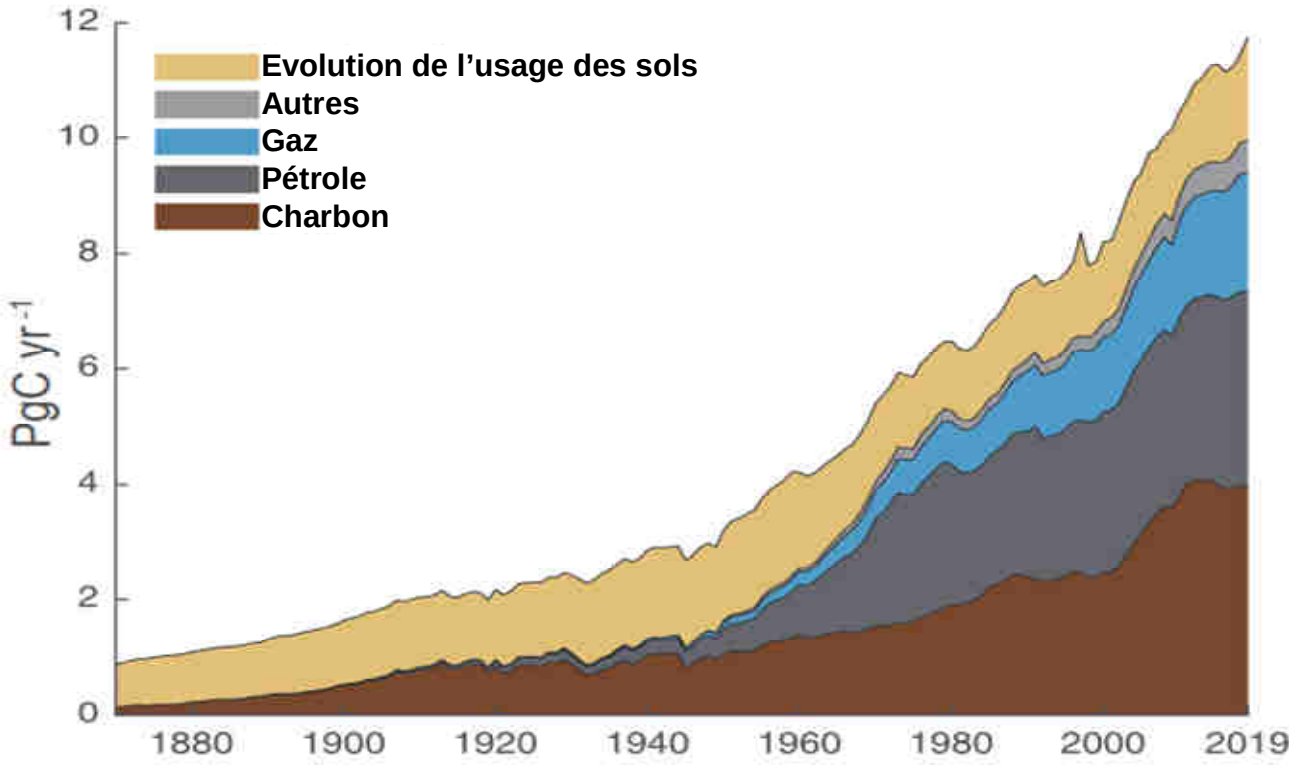


Figure 2-4 : Causes d'émission de CO2 (© GIEC).

Les frigorigènes ont comme origine les fuites des réfrigérateurs et des climatisations (hydrocarbofluorures et chlorures) et aussi pour fabriquer des matelas à bulles en Chine (bien que ce soit interdit).

Concernant le méthane, la Figure 2-5 indique que les sources de méthane provienent de l'industrie, l'agriculture dans les terrains humides, comme les rizières, l'élevage et la méthanisation des déchets, brûlés ou non.

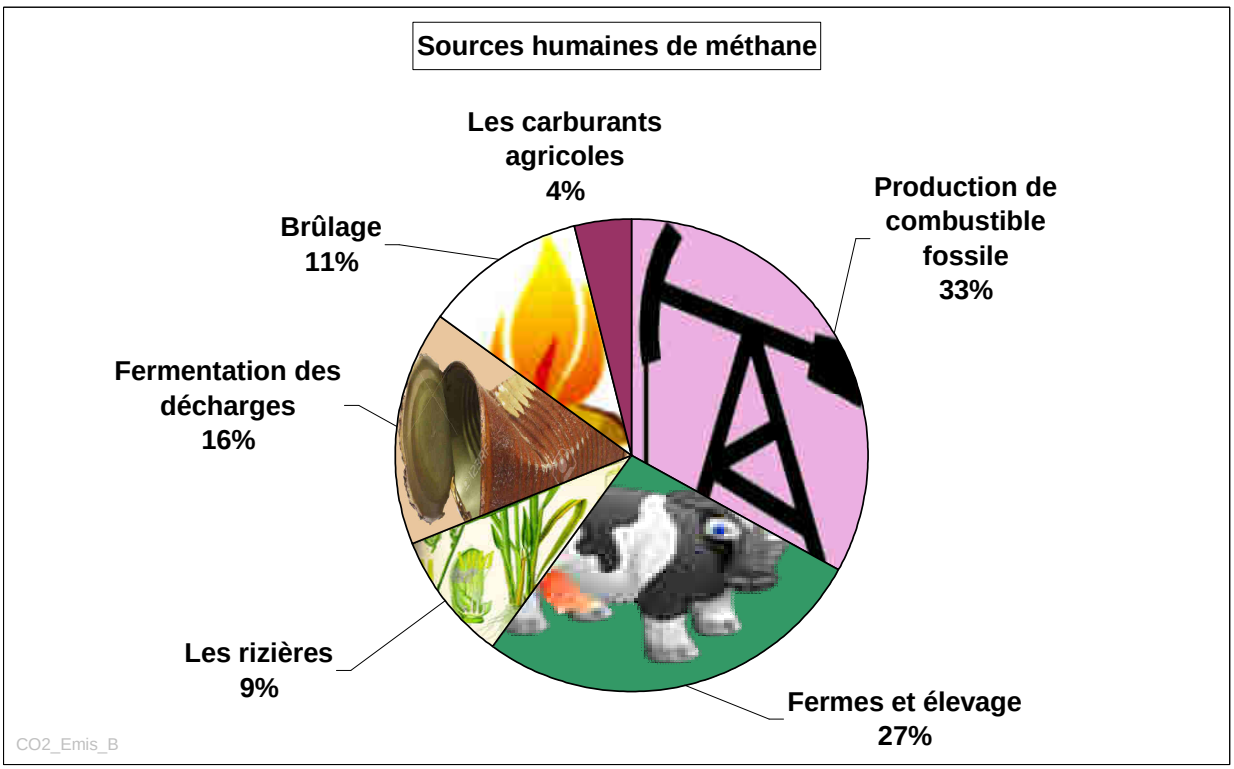


Figure 2-5 : Sources de méthane atmosphérique (données CITEPA 2019)

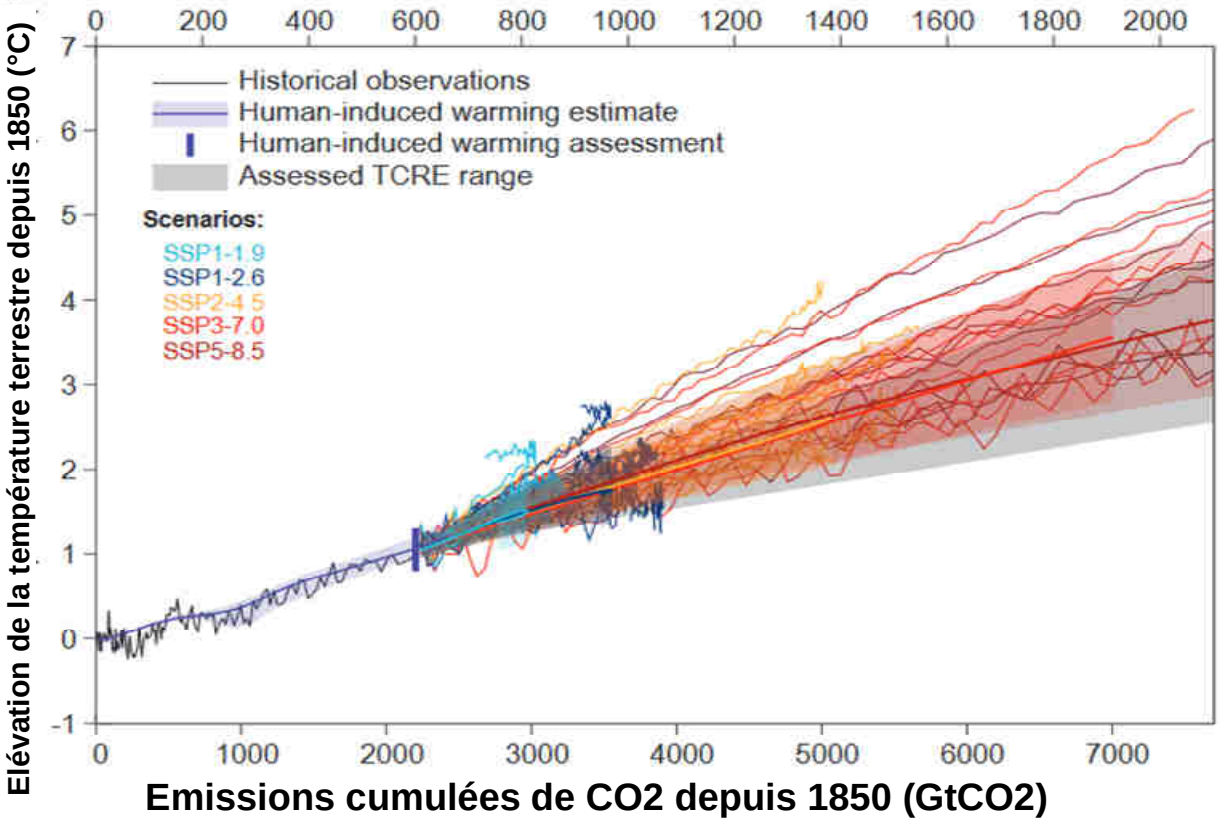


Figure 2-6 : Corrélation relevée entre les émissions de CO2 et le réchauffement terrestre moyen (© GIEC).

2. 1. 3. La longévité dramatique des gaz à effet de serre

Une fois émis dans l'atmosphère, les gaz à effet de serre se dégrade lentement, d'autant plus lentement que ce sont des molécules stables, comme les fluorures, les chlorures et les oxydes (CO2).

La Figure 2-7, indique la capacité de ces gaz à filtrer les IR, en ordonnée et leur durée de vie dans l'atmosphère en abscisse (echelles logarithmiques).

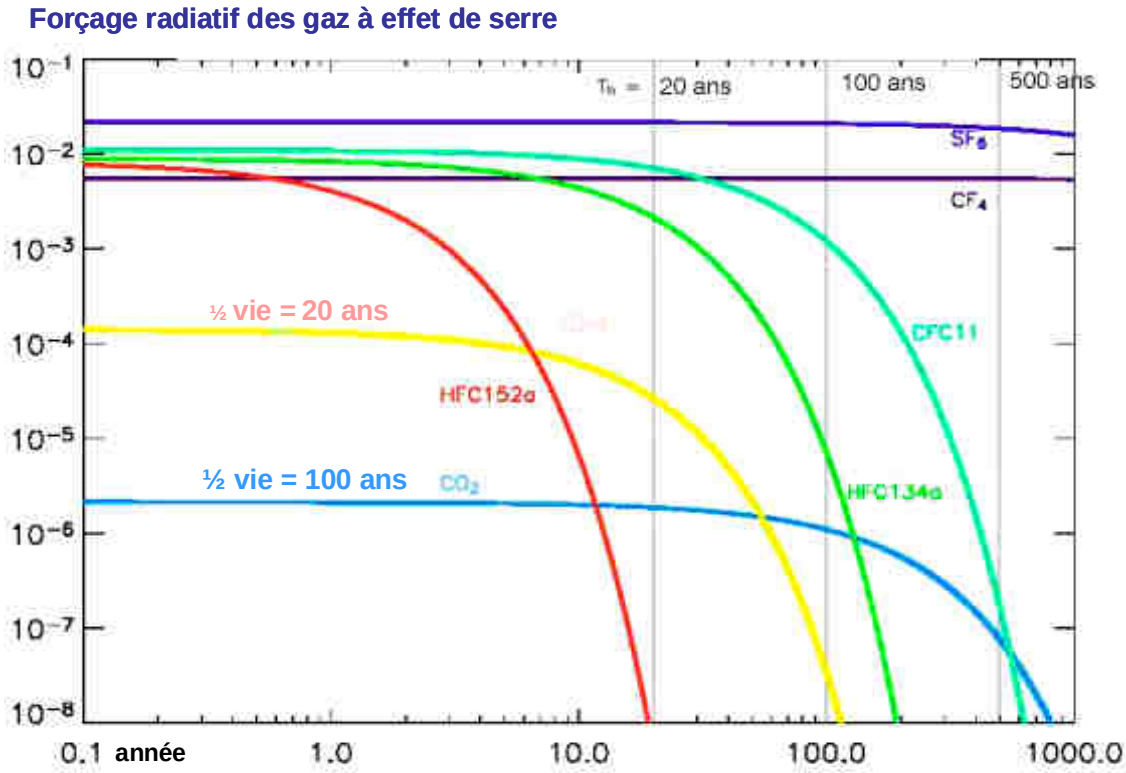


Figure 2-7 : « Pouvoir de réchauffement global » et durabilité des gaz à effet de serre.

La durée de vie des gaz à effet de serre est dramatiquement longue. Le CO_2 qui sert de référence pour comparer le Pouvoir de Réchauffement Global (effet de serre * longévité) des gaz à effet de serre, a une demi-vie de 120 ans. Le méthane (CH_4) a un pouvoir de filtrage environ 24 fois plus élevé, mais une demi-vie de seulement 20 ans, c'est-à-dire que son pouvoir est divisé par 2 tous les 10 ans, donc, à concentration égale, un effet inférieur au CO_2 après 45 ans. Les frigorigènes sont des gaz à effet de serre très puissants et à durée de vie longue. Heureusement, il ne sont émis qu'à faible dose, à cause de fuites. La réglementation actuelle oblige à n'utiliser que des frigorigènes au Pouvoir de Réchauffement Global réduit. Mais des entreprises étrangères (chinoises) ne respecrent pas cette règlementation.

2. 2 Part de chaque cause de réchauffement terrestre

La Figure 2-8 représente la part d'effet de chaque cause de réchauffement : les gaz à effet de serre anthopiques (gaz carbonique CO_2, méthane CH_4, protoxyde d'azote N_2O, Ozone O3, halogènes), des aérosols (microparticules d'origine industrielle ou du trafic), le volcanisme et l'influence du cycle des taches solaires. A noter l'accroissement résultant de 1°C, alors que les effets anthropiques seuls ont eu une influence supérieure (1,3°).

A Lyon, d'accroissement a été de 1,2°C.

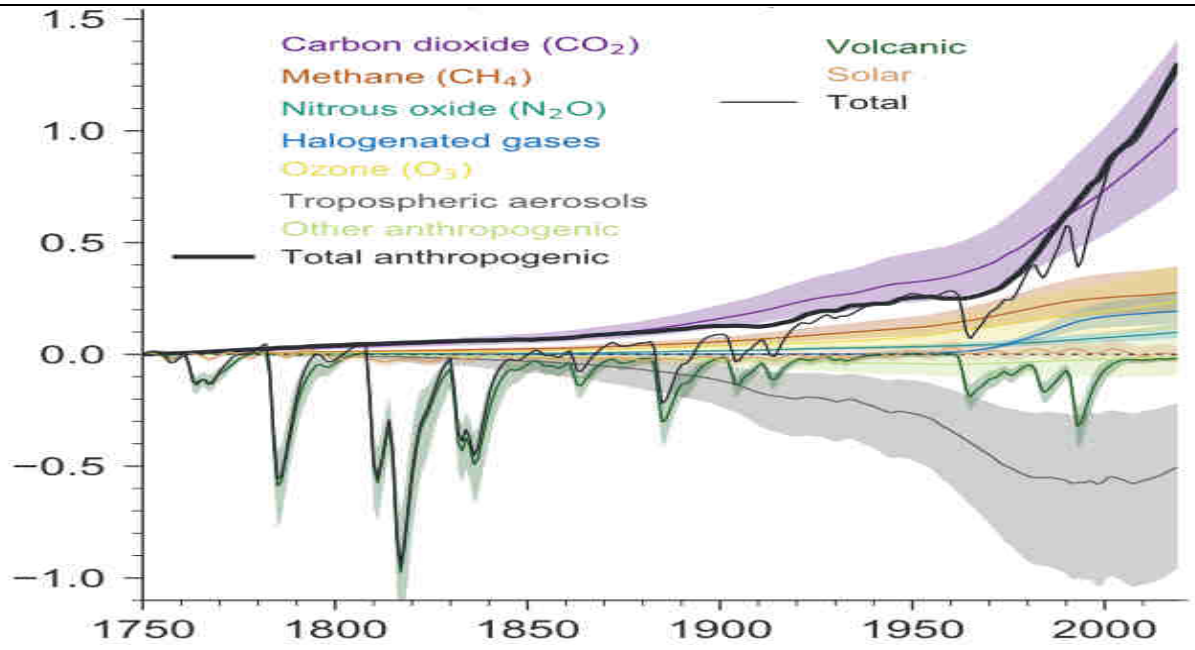


Figure 2-8 : Influence de chaque cause de variation de température globale terrestre (© GIEC).

3 La modélisation du changement climatique

3. 1 Recourir aux modélisations pour prévoir l'avenir

La planète se réchauffe avec l'accumultation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus rapide que leur absorption. Pour prévoir l'évolution, de très nombreux scientifiques ont modélisé mathématiqement l'effet de tous les phénomènes naturels et entopomorphiques qui influent sur la température terrestre (Figure 3-1).

L'écologie est une science complexe à modéliser, car elle implique de synthétiser de multiples connaissances :

- ⇨ Physiques,
- ⇨ Sociologiques,
- ⇨ Economiques,
- ⇨ Psychologiques (les réactions humaines),
- ⇨ Prévisions statistiques…

Les évolutions doivent être évaluées en fonction de l'ensemble de leurs conséquences probables, de toutes natures. Alors que, malheureusement, les informations exprimées dans les médias ou prises en compte par des politiques ne prennent que rarement en compte l'ensemble des effets induits et rebonds.

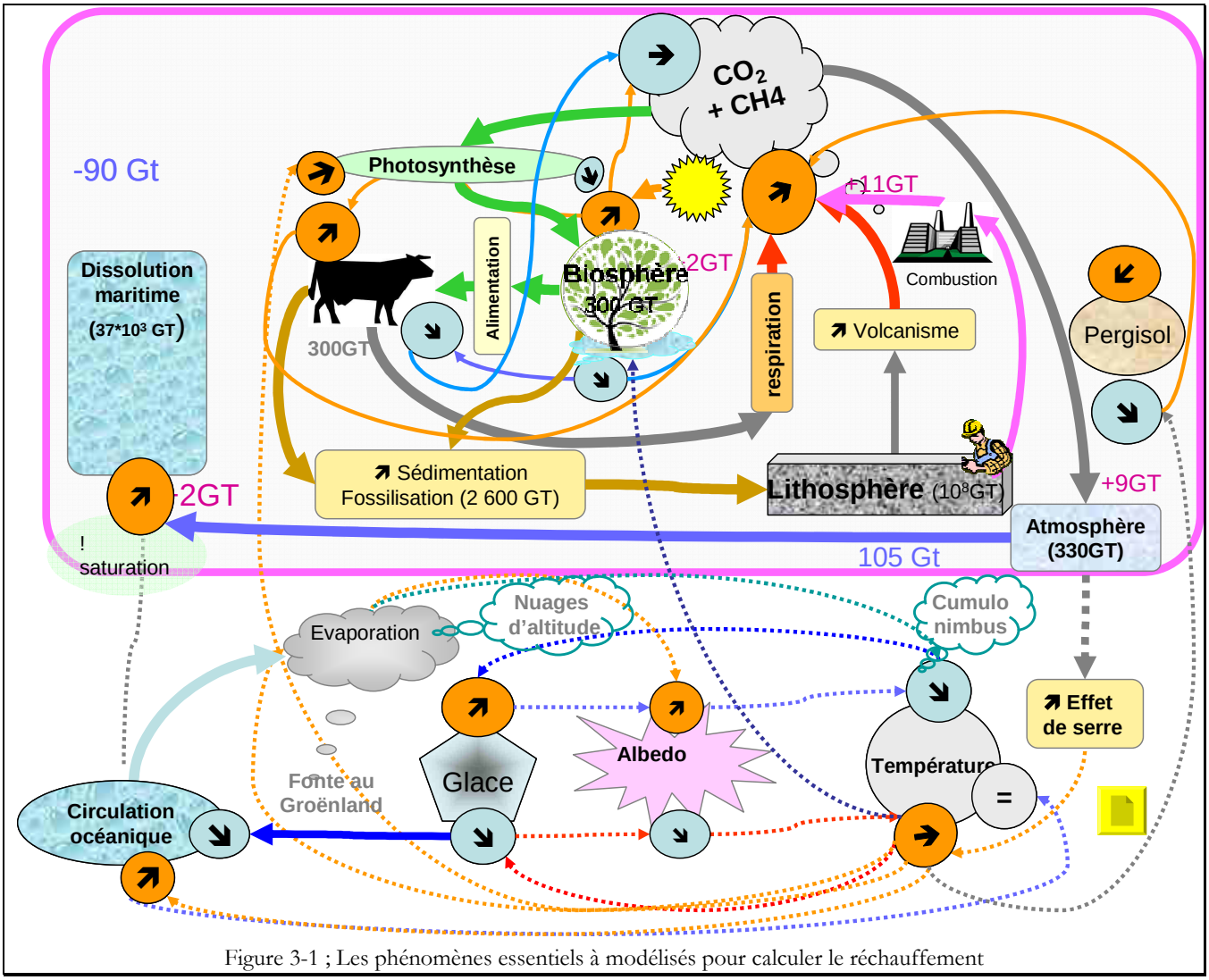


Figure 3-1 ; Les phénomènes essentiels à modélisés pour calculer le réchauffement

3. 2 L'évolution des modélisations

Les scientifiques ont commencé leurs modélisations dans les années 1970. Progressivement les phénomènes pris en compte se sont complexifiés. Les rapports du GIEC sont sortis tous les 6 ans en moyenne et ont pris en compte progressivement plus de phénomènes et chaque phénomène avec plus d'exactitude (Figure 3-2).

Pasrallèlement les modélisations, consistant à faire des calculs sur des parallélipipèdes juxtaposés, en ont diminué la taille.

Les modélisatons présentées par le 6ème rapport du GIEC correspondent à des calculs sur des surfaces de 75 km de côté et une cinquantaine de niveaux verticaux, dans l'atmosphère et les océans. Cela permet de fournir une modélisation régionale par zone tel que défini Figure 3-3.

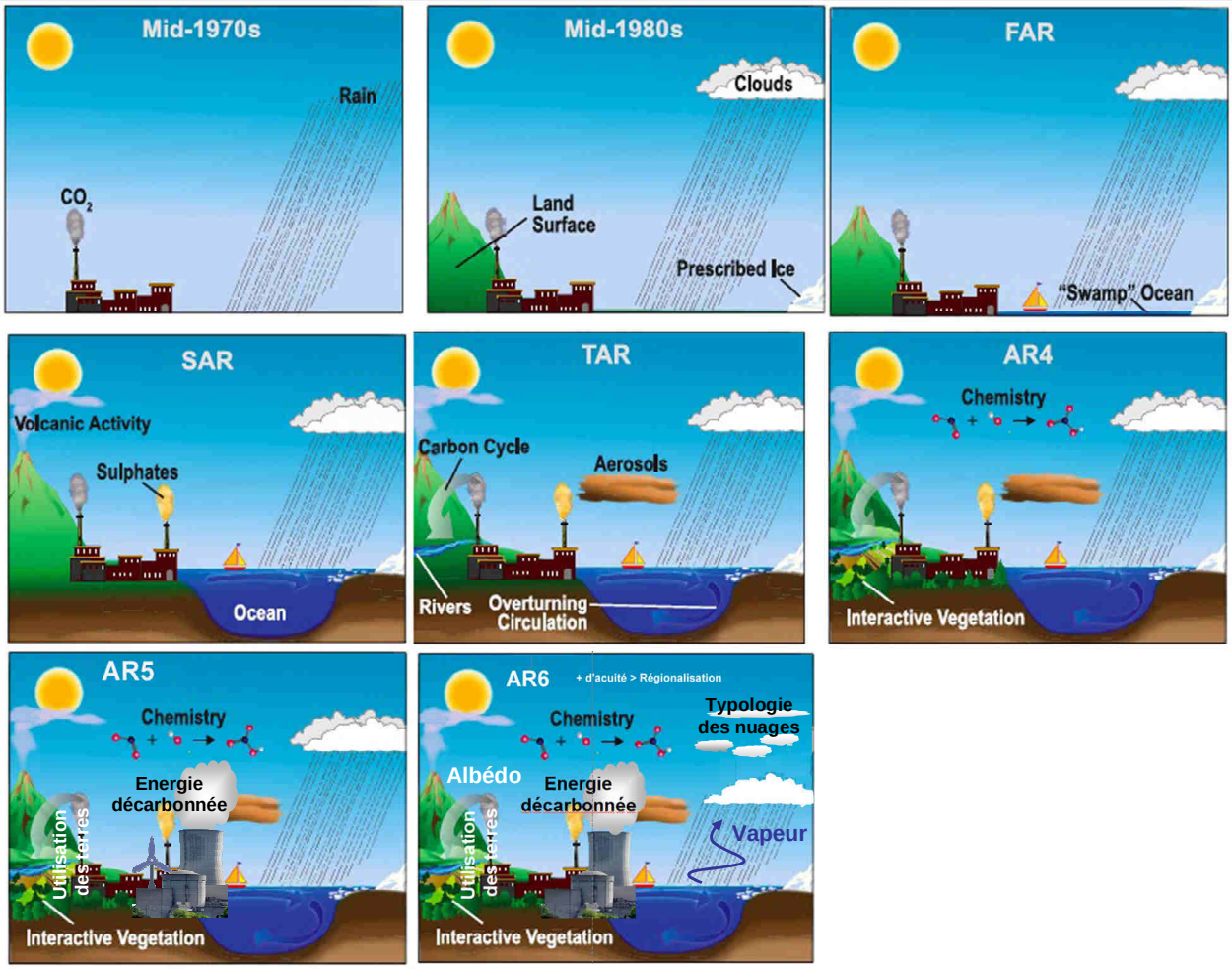
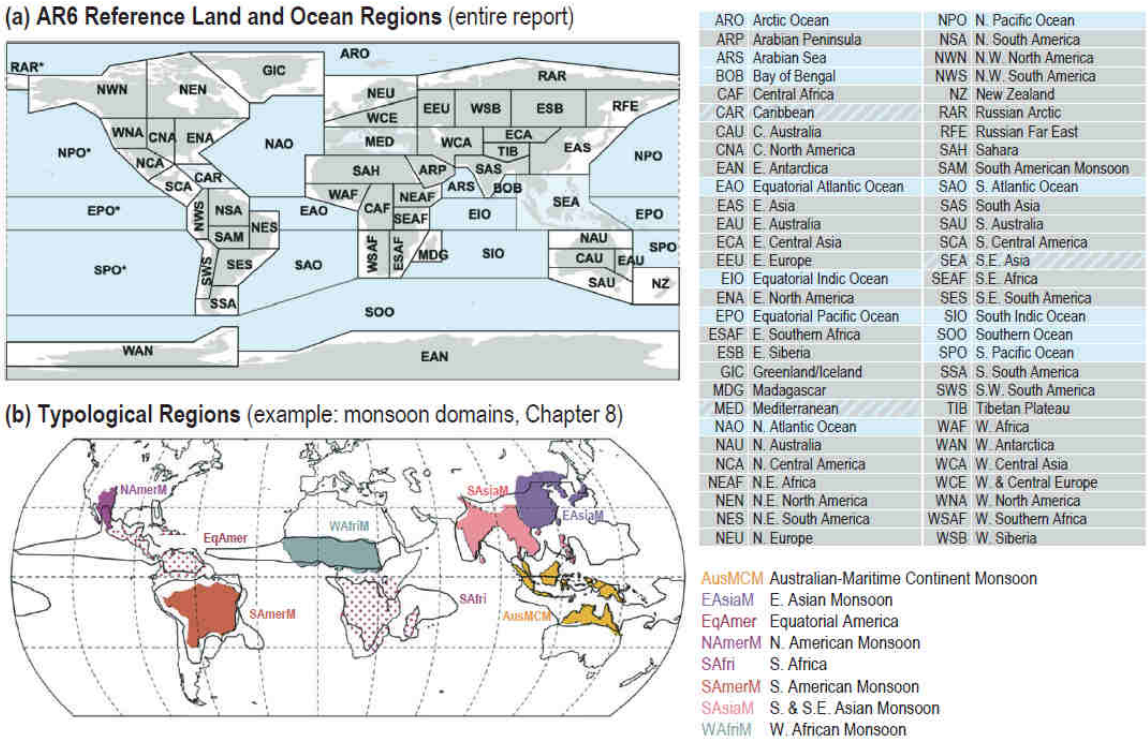


Figure 3-2 : phénomènes progressivement pris en compte par les modélisation (JM Jancovici)



ARO	Arctic Ocean	NPO	N. Pacific Ocean
ARP	Arabian Peninsula	NSA	N. South America
ARS	Arabian Sea	NWN	N.W. North America
BOB	Bay of Bengal	NWS	N.W. South America
CAF	Central Africa	NZ	New Zealand
CAR	Caribbean	RAR	Russian Arctic
CAU	C. Australia	RFE	Russian Far East
CNA	C. North America	SAH	Sahara
EAN	E. Antarctica	SAM	South American Monsoon
EAO	Equatorial Atlantic Ocean	SAO	S. Atlantic Ocean
EAS	E. Asia	SAS	South Asia
EAU	E. Australia	SAU	S. Australia
ECA	E. Central Asia	SCA	S. Central America
EEU	E. Europe	SEA	S.E. Asia
EIO	Equatorial Indic Ocean	SEAF	S.E. Africa
ENA	E. North America	SES	S.E. South America
EPO	Equatorial Pacific Ocean	SIO	South Indic Ocean
ESAF	E. Southern Africa	SOO	Southern Ocean
ESB	E. Siberia	SPO	S. Pacific Ocean
GIC	Greenland/Iceland	SSA	S. South America
MDG	Madagascar	SWS	S.W. South America
MED	Mediterranean	TIB	Tibetan Plateau
NAO	N. Atlantic Ocean	WAF	W. Africa
NAU	N. Australia	WAN	W. Antarctica
NCA	N. Central America	WCA	W. Central Asia
NEAF	N.E. Africa	WCE	W. & Central Europe
NEN	N.E. North America	WNA	W. North America
NES	N.E. South America	WSAF	W. Southern Africa
NEU	N. Europe	WSB	W. Siberia

AusMCM	Australian-Maritime Continent Monsoon
EAsiaM	E. Asian Monsoon
EqAmer	Equatorial America
NAmerM	N. American Monsoon
SAfri	S. Africa
SAmerM	S. American Monsoon
SAsiaM	S. & S.E. Asian Monsoon
WAfriM	W. African Monsoon

Figure 3-3 : Régionaalisation des résultats des modémisation du 6ème rapport (© GIEC).

3. 3 Principe des scénarios de modélisation

Partant d'hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre, les modélisations calculent les concentrations futures.

En appliquant l'ensemble des lois physique et notamment le forçage radiatif, les modélisations calculent les variations de températures locales et globales, ainsi que l'ensemble des phénomènes physiques représentés Figure 3-5.

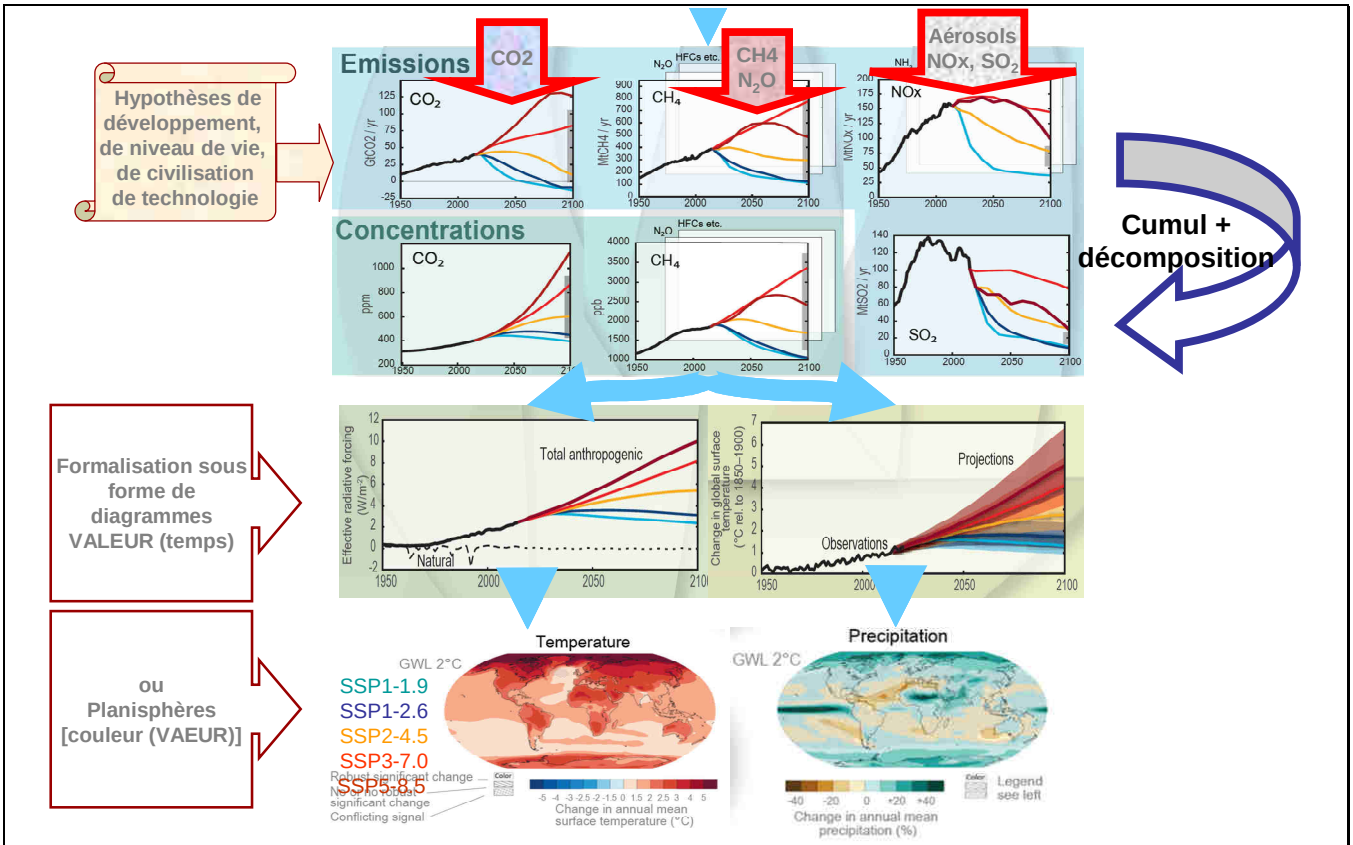


Figure 3-4 : Processus de simulation (© GIEC).

L'ensemble des phénomènes de dérèglement induits est fourni par la Figure 3-5.

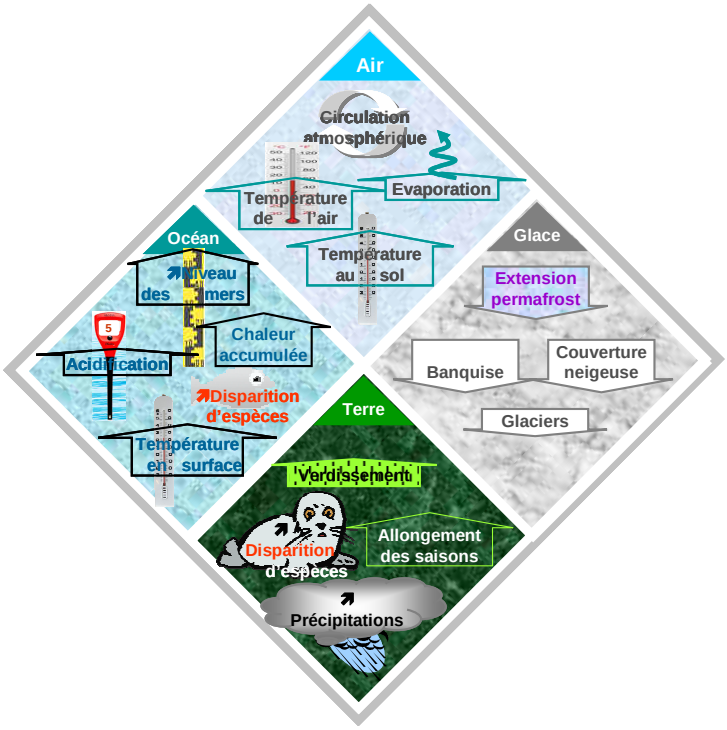


Figure 3-5 : Esemble des phénomènes mosélisés par le scénarios du 6ème rapport (© GIEC).

4 Les hypothèses fondamentales des scénarios

Les modélisations impliquent de prendre en compte l'ensemble des phénomènes naturels : volcanisme, astrologie terrestre, taches solaires et de faire des hypothèses fondamentales pour en déduire le réchauffement :

- ⇨ l'évolution de la population ;
- ⇨ niveau de vie (PIB) ;
- ⇨ les émissions d'aérosols qui limitent l'arrivée au sol des rayonnements ;
- ⇨ les émissions de gaz à effet de serre selon la source primaire d'énergie consommée ;
- ⇨ les absorptions et stockage du CO2 : (CCS, usage des sols : *Forêts, cultures, prairies biocarburants…*) ;

Selon le type d'énergies primaire utilisée, notamment : renouvelables, nucléaire ou hydrocarbures et charbon

4. 1 Les 5 types de scénarii

Le GIEC a classé les scénarii (Shared Socio-economic Pathways) en 5 types, selon 2 axes d'engagement :

- ⇨ le chalenge socio-économique de réduction des émissions de gaz) effet de serre, d'une part,
- ⇨ le chalenge de collaboration entre nations, car la concurrnce entre elles serait nuisible aux bonnes mesures.

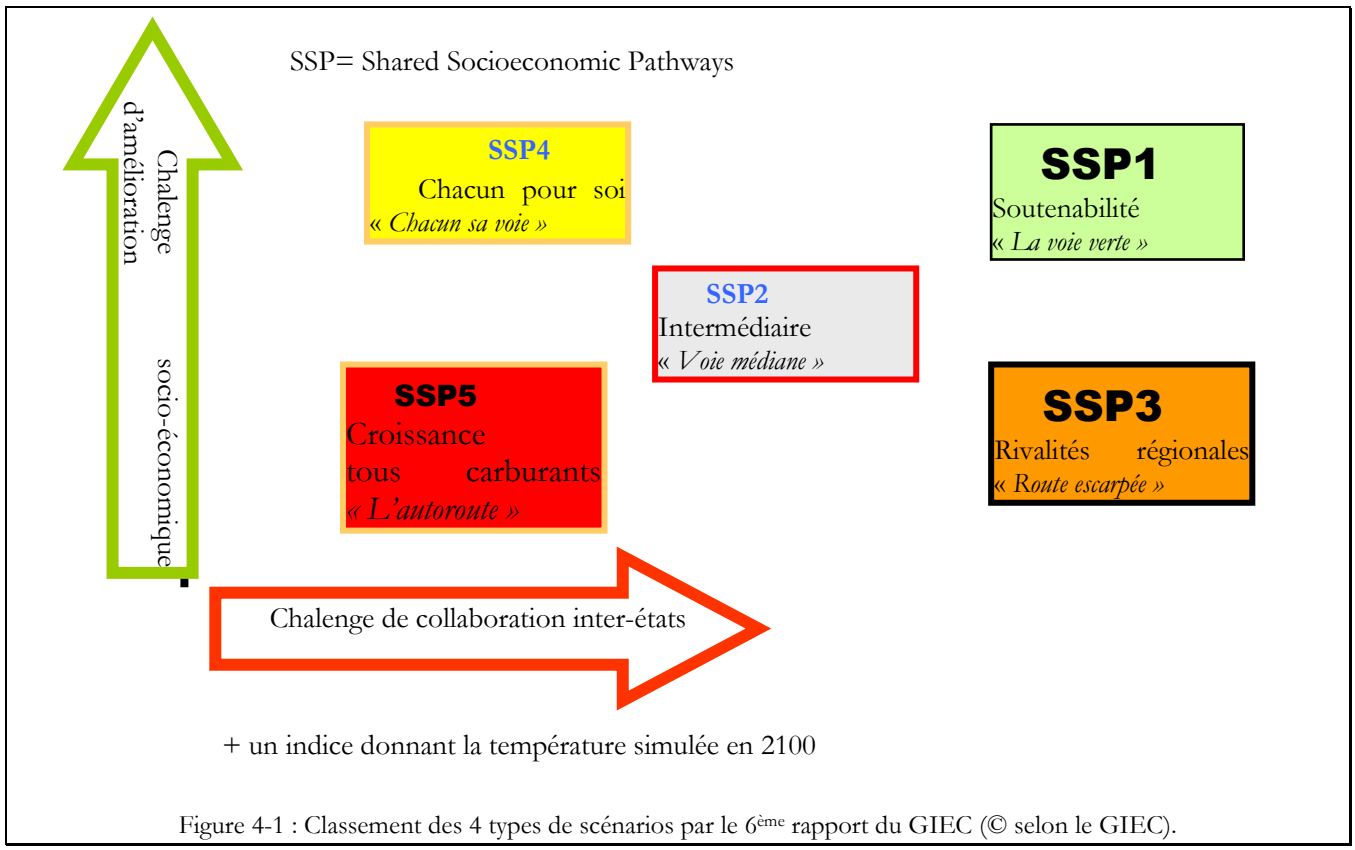


Figure 4-1 : Classement des 4 types de scénarios par le 6ème rapport du GIEC (© selon le GIEC).

Les noms des scénarios sont affectés d'un indice qui indique le réchauffement en 2.100, par rapport à l'époque préindustrielle. Par exemple un scénario médian $SSP2_{4,5}$ prévoit un accroissemnt de 4,5°C, soit 3,5°C par rapport au présent, ce qui est considérable, comme nous allons le voir.

4. 2 L'évolution de la population

Les émissions de CO2 sont très conditionnées (proportionnelles) à la population. Or la population mondiale, depuis la fin de la guerre de 1940 a été multipliée par plus de 4. La natalité et la mortalité conditionnent l'évolution de la population. Selon les statistiques de l'ONU, les courbes se croisent en 2080, pour une décroissance de la population. La courbe résultante d'évolution est donnée Figure 4-2. Mais l'évolution dépendra surtout du niveau de culture des femmes africaines, voire de la mortalité accrue par la chaleur. Les scénarios moyens prennet en compte les prévisions de l'ONU (organisatrice du GIEC). Des diminutions de population plus précoces, quoiqu'hypothétiques, sont prises en compte par des scénarios donnant des résultats moins pessimistes.

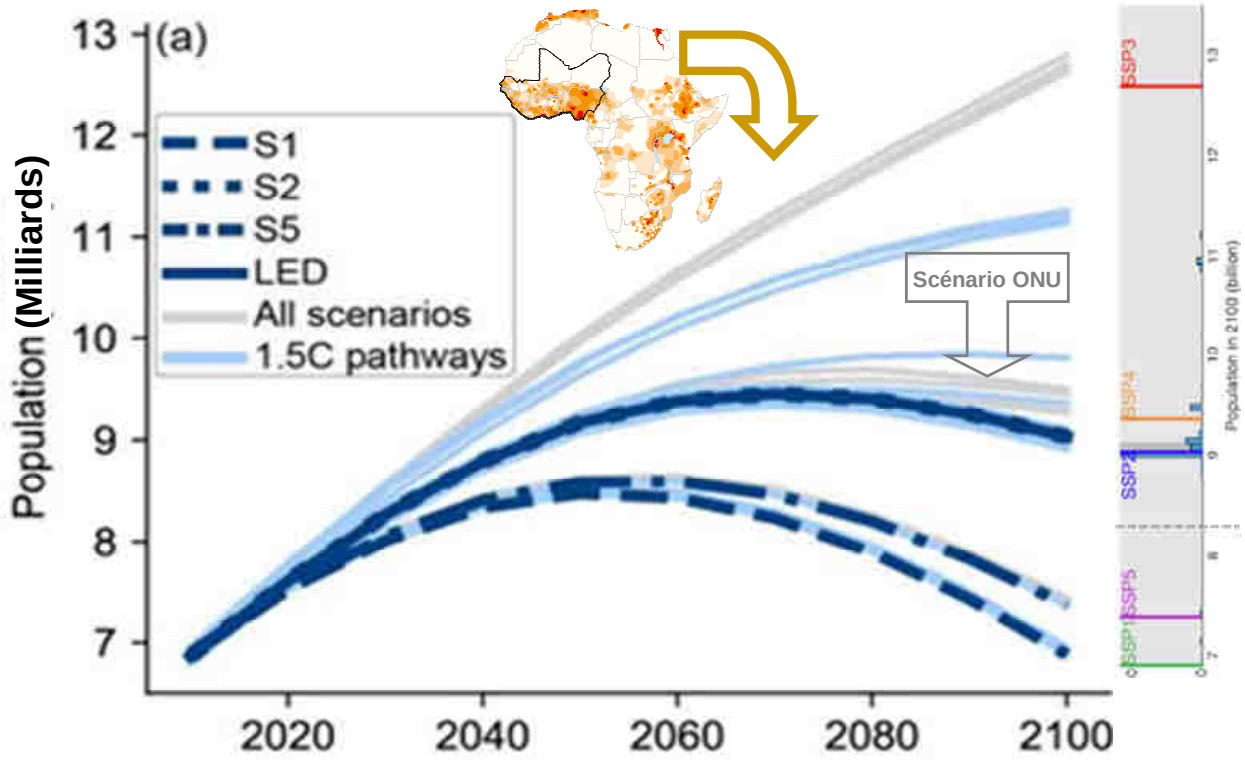


Figure 4-2 : Courbes d'évolution de la population selon les hypothèses des scénarii (© GIEC).

4. 3 Hypothèses d'accroissement d'activité et de niveau de vie

Selon les études du « Shift Project », il existe une forte corrélation (mathématiquement une cointégration) entre l'évolution du PIB et la consommation d'énergie. Par conséquent, les émissions de CO_2 dues à la consommation d'énergie carbonée sont engendrés par la production mondiale brute, qui (avec une bonne approximation) est conditionnée par le niveau de vie des population (de façon inéxorable, mais avec une possibilité d'amélioration lente, à l'echelle de décennies). Les hypothèses d'accroissement du niveau de vie moyen des population de la planète par les divers scénarios sont présentées par la Figure 4-3.

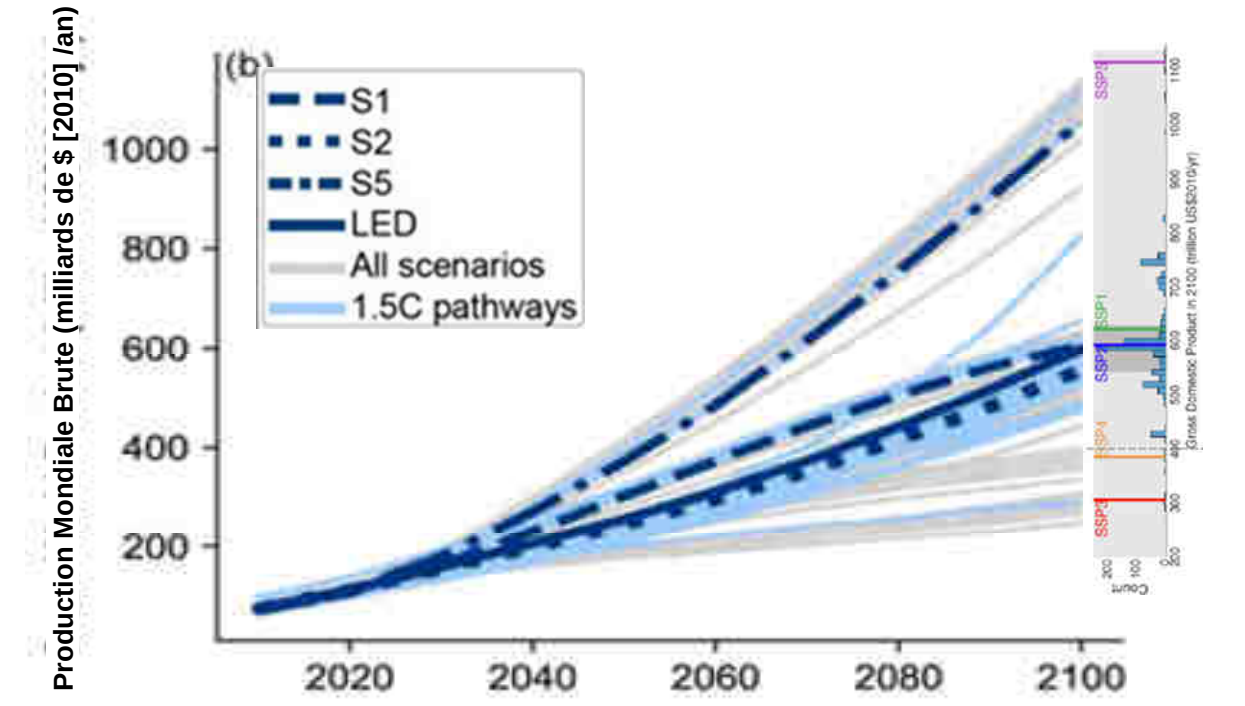


Figure 4-3 : évolution prévue du niveau de vie mondial moyen par les dvers scénarii (© GIEC).

4. 4 Emission de CO2 simulés par les scénarios types

La Figure 4-4 représente les émissions de gaz à effet de serre (G.E.S.) simulés par les divers types de scénarii.

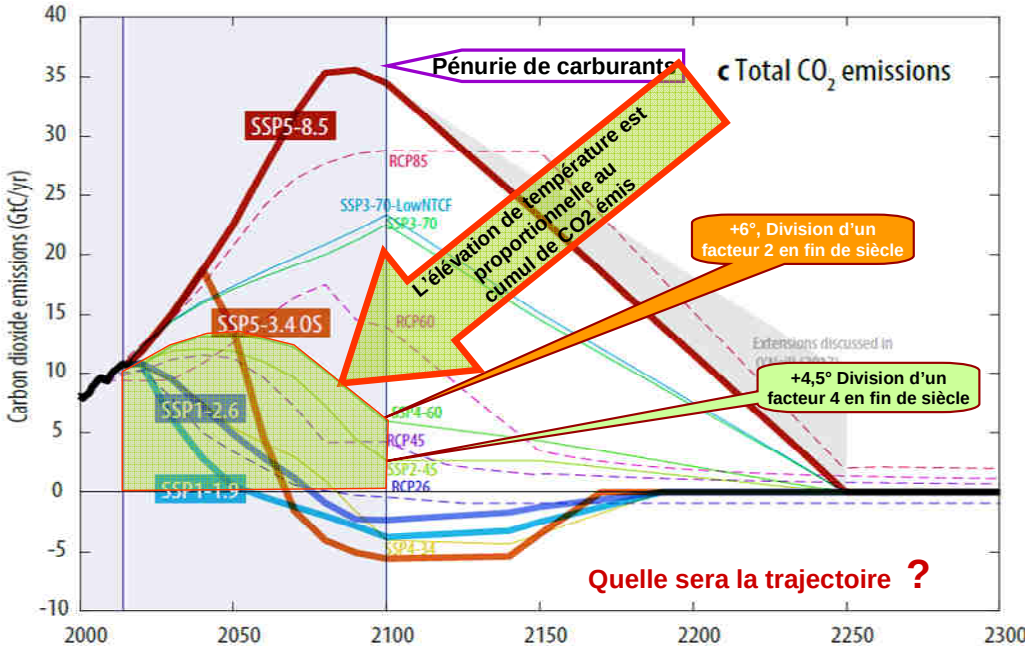


Figure 4-4 : Diverses hypothèses d'émission de CO2. et les température correspondantes en 2100 (© GIEC).

4. 5 L'accroissement de température selon les scénarii types

Comme les gaz à effet de serre sont longs à s'éliminer, c'est grosso-modo la surface sous la courbe des émissions de G.E.S. qui défini l'accroissement de température, par rapport à l'instant présent.

L'accroissement de températre simulé en 2100, qui sert de référence varie de 0,5°C à 5,5°, selon les scénarios.

Même un scénario moyen, relativement optimiste (SSP2-4,5) prévoit un réchauffement de 2°C en fin de siècle.

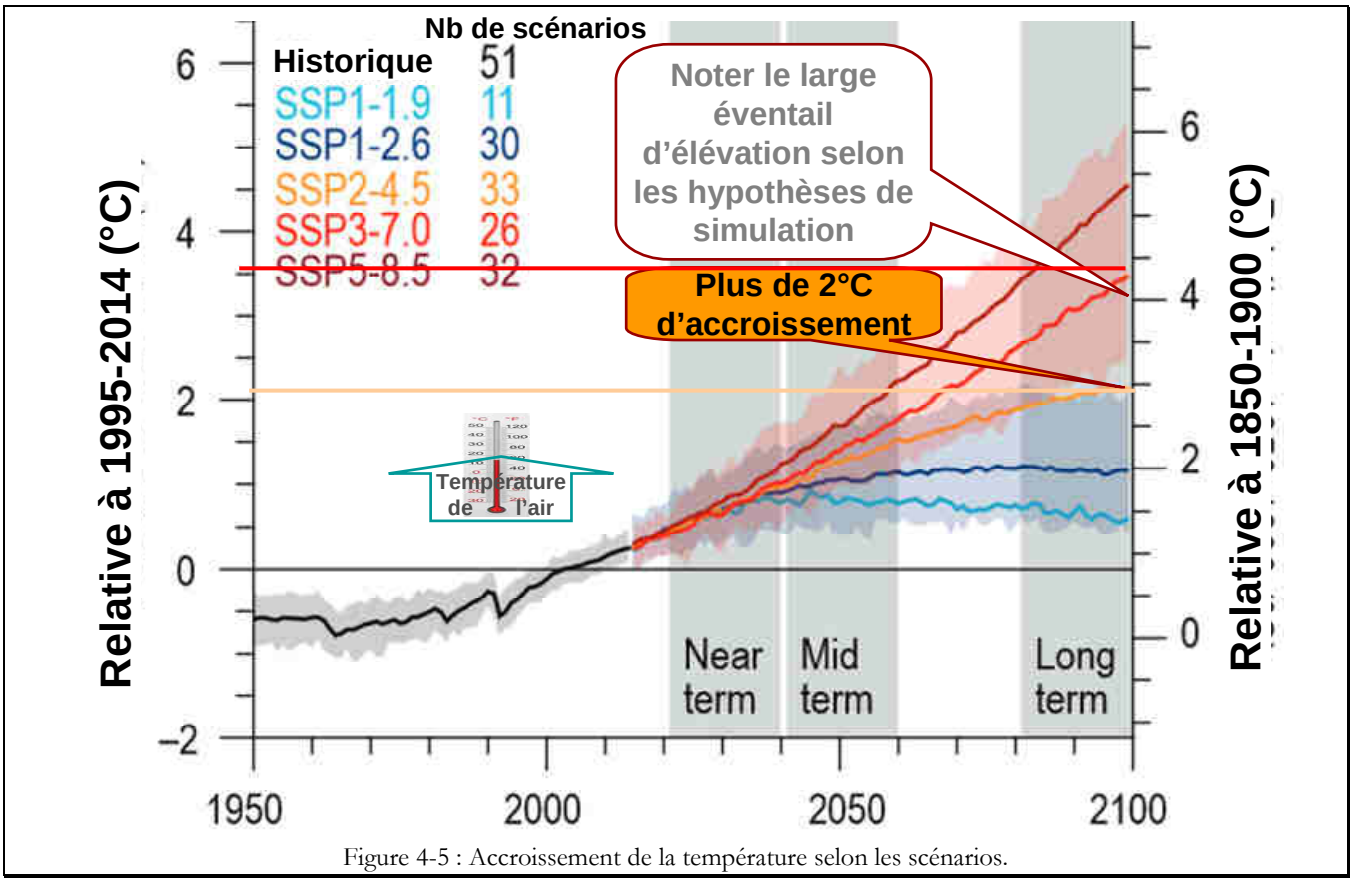


Figure 4-5 : Accroissement de la température selon les scénarios.

Cependant, la gravité de l'accroissement de température est pire, car la violence des dérèglements et des phénomènes extrêmes (canicules, sécheresses, déluges, cyclones) croit davantage que la température moyenne.

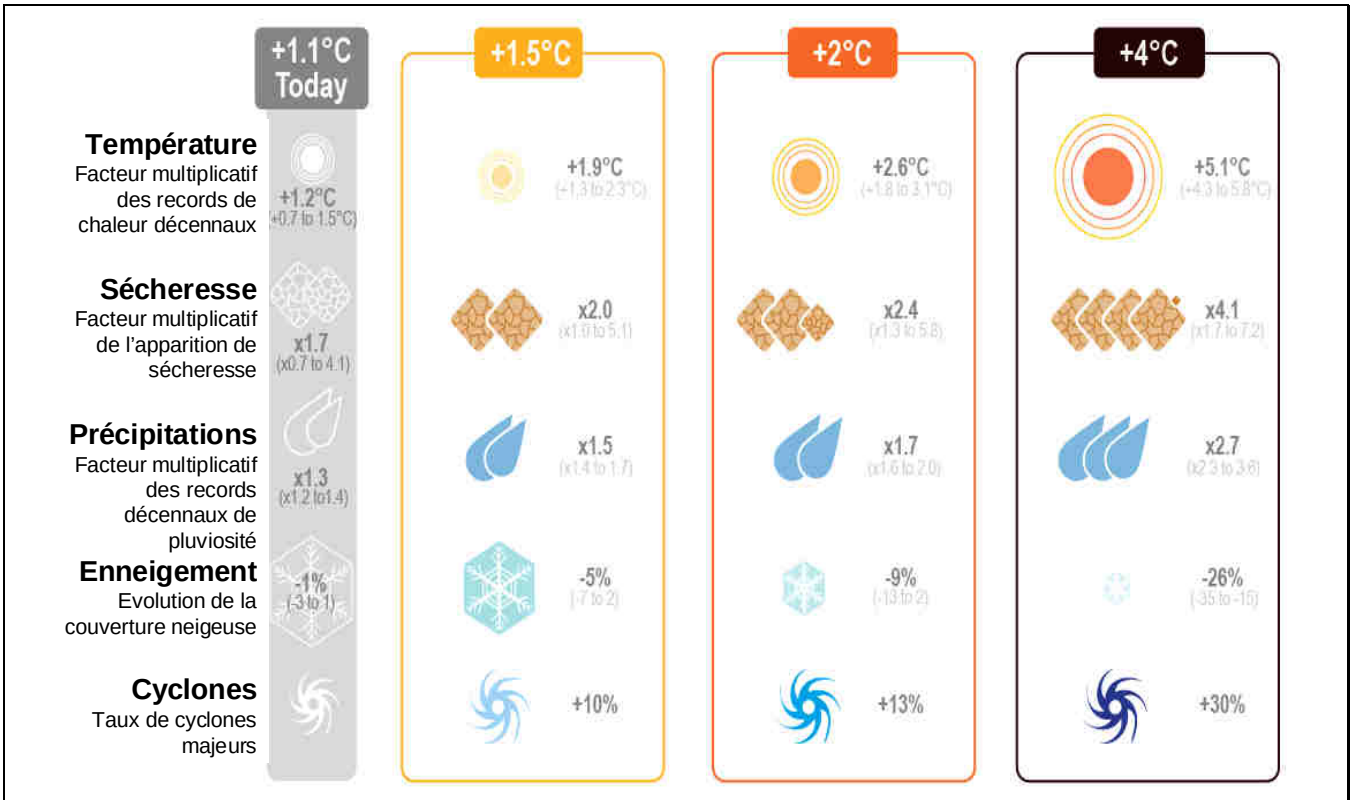


Figure 4-6 : Gravité des dérèglements accrue par rapport à l'accroissement de température.

4. 6 Ecarts de température selon la latitude

L'évolution de la température différera selon la lattitude. Le réchauffement s'accélérera plus dans les hautes lattitudes, notamment arctiques et surtout en hiver (+3°C), même dans les scénarii optimistes.

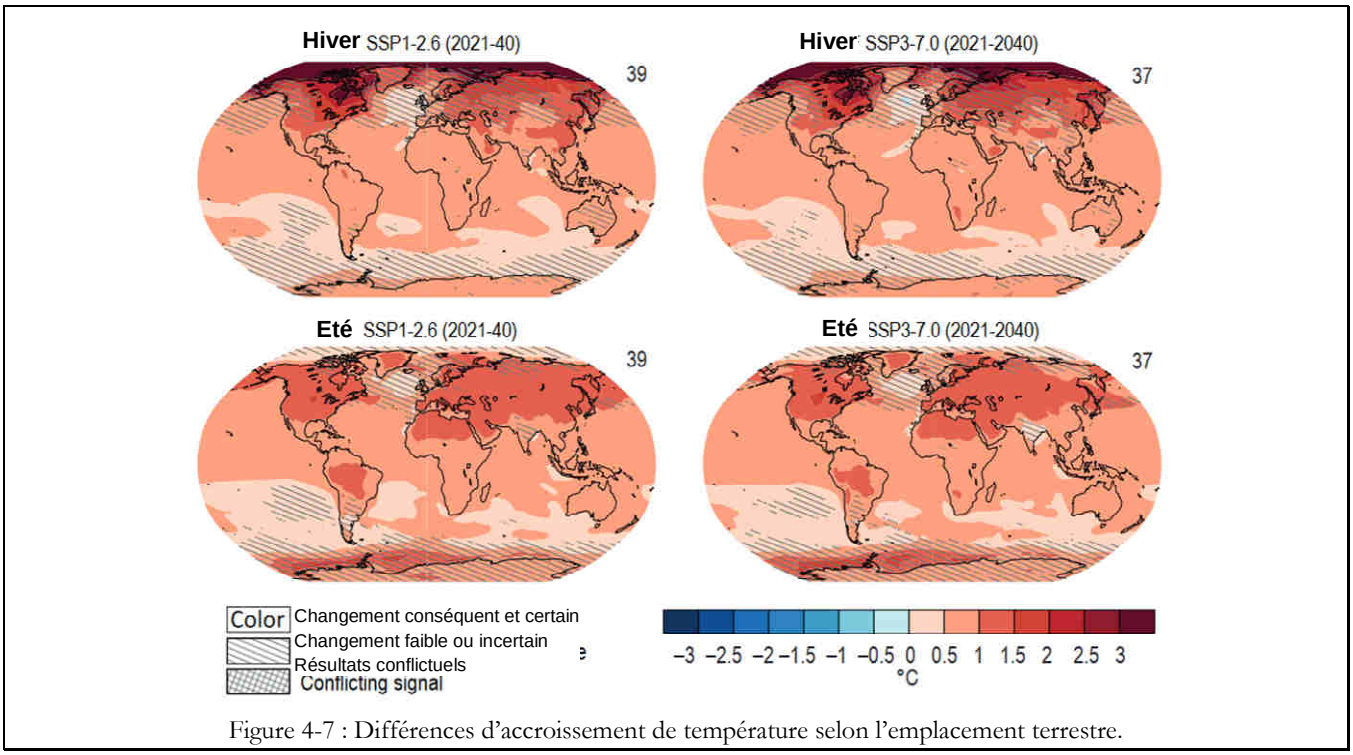


Figure 4-7 : Différences d'accroissement de température selon l'emplacement terrestre.

Le réchauffement nord atlantique induira un ralentissement et détournement du Golf Stream et donc au moindre réchauffement nord atlantique.

4. 7 Disparition de la banquise

En conséquence, dans les scénarios les moins optimistes, la banquise devrait disparaître complètement dès la moitié du siècle et de 70% dans les scénarios le plus optimistes.

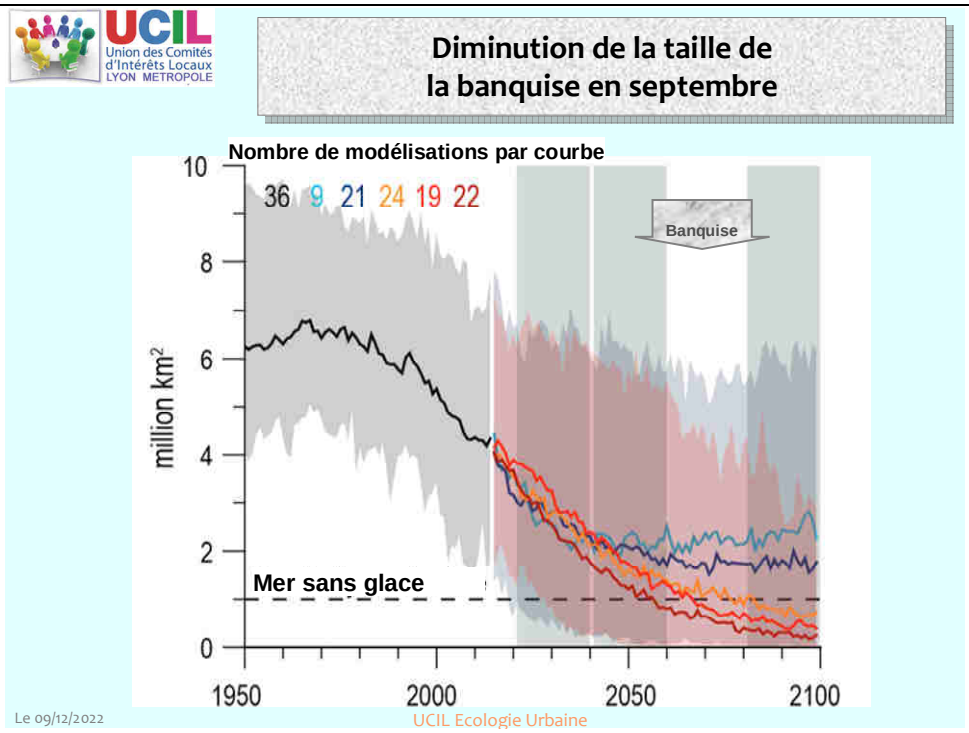


Figure 4-8 : Modélisation de la disparition de la banquise

4. 8 Accroissement moyen des précipitations

A cause du réchauffement, les précipitations moyennes s'accroîtront entre 2 et 10%, cette évolution différant selon les régions (Figure 4-10).

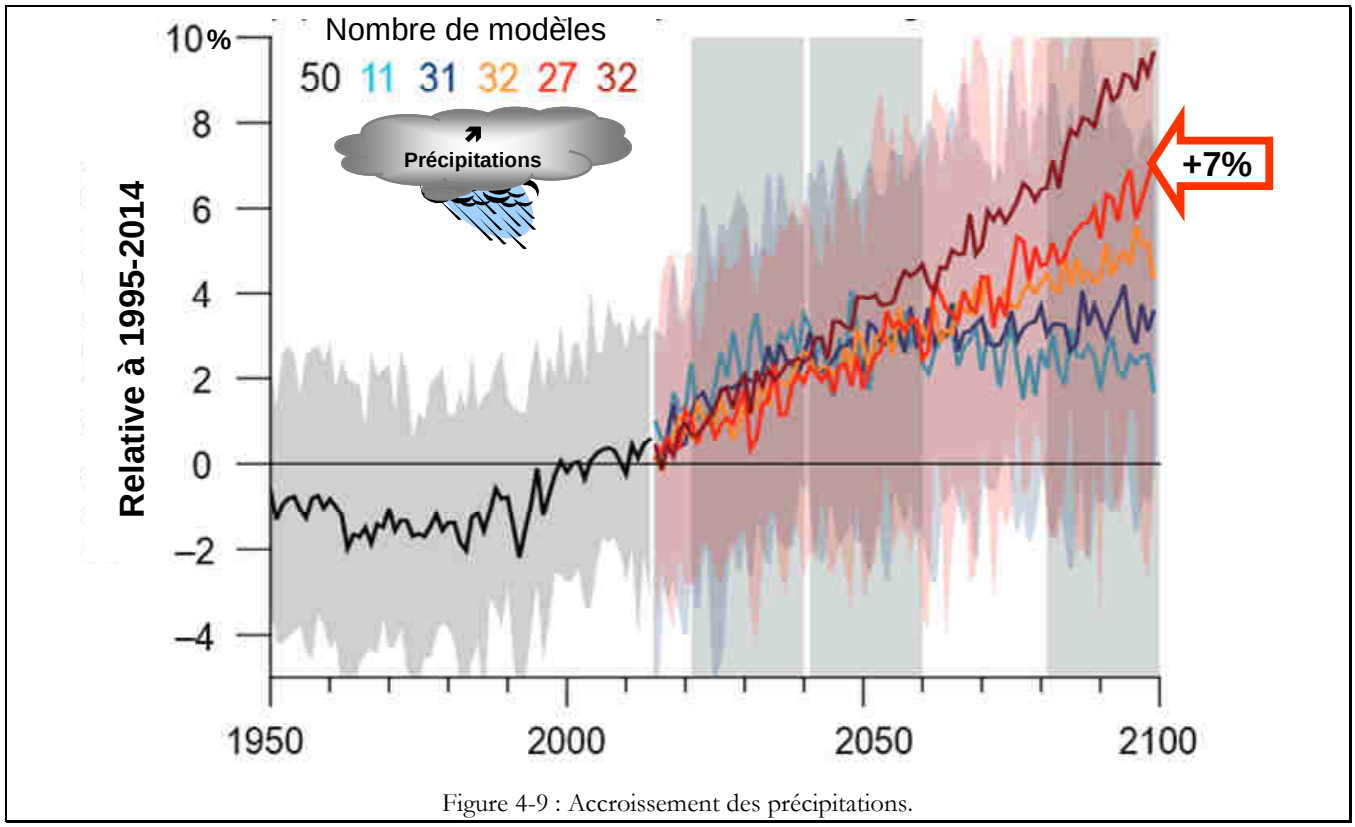


Figure 4-9 : Accroissement des précipitations.

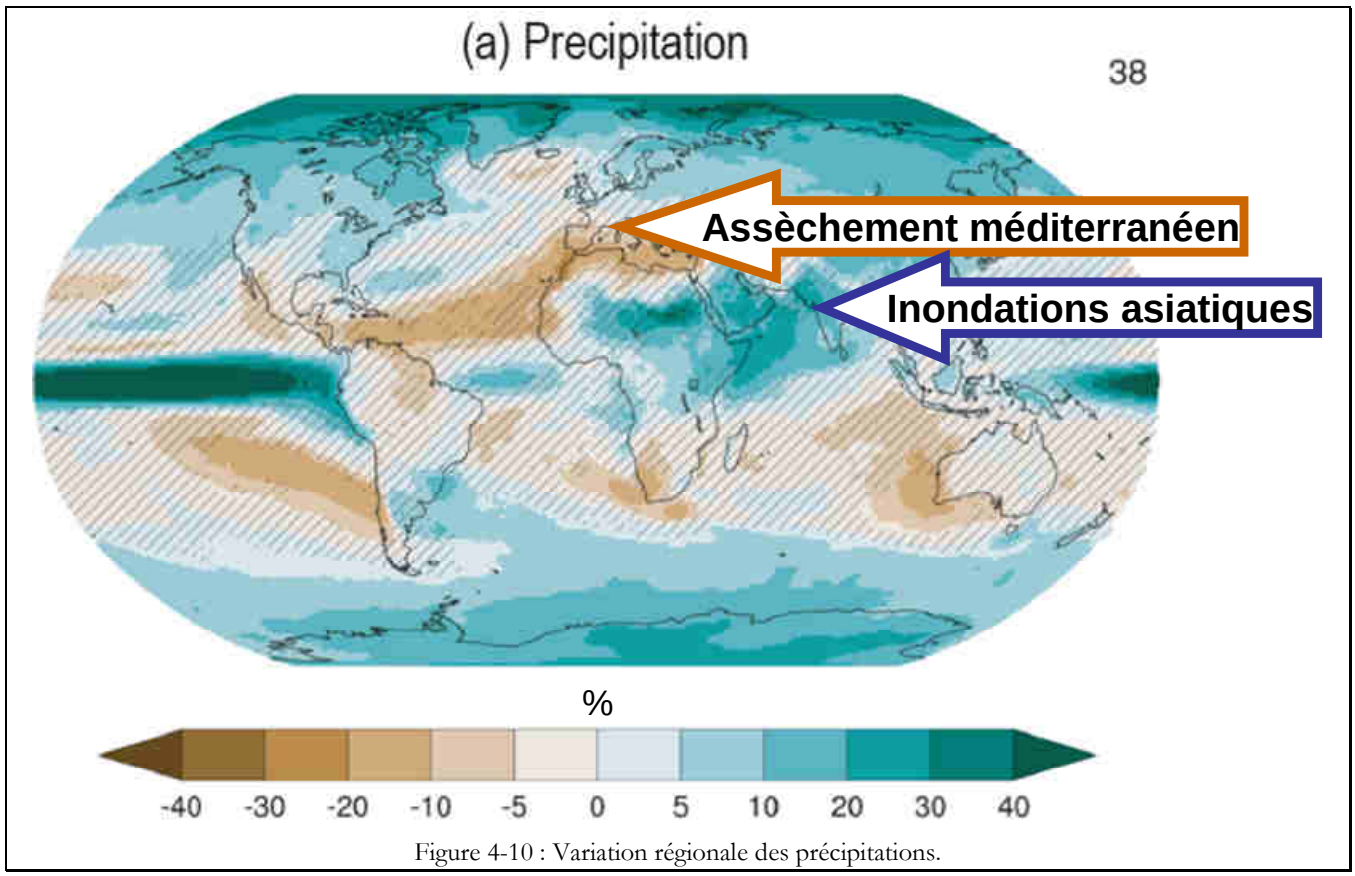


Figure 4-10 : Variation régionale des précipitations.

Plus dangereux pour la vie, l'élévation de température s'accompagnera de périodes de sécheresse, notamment en Europe.

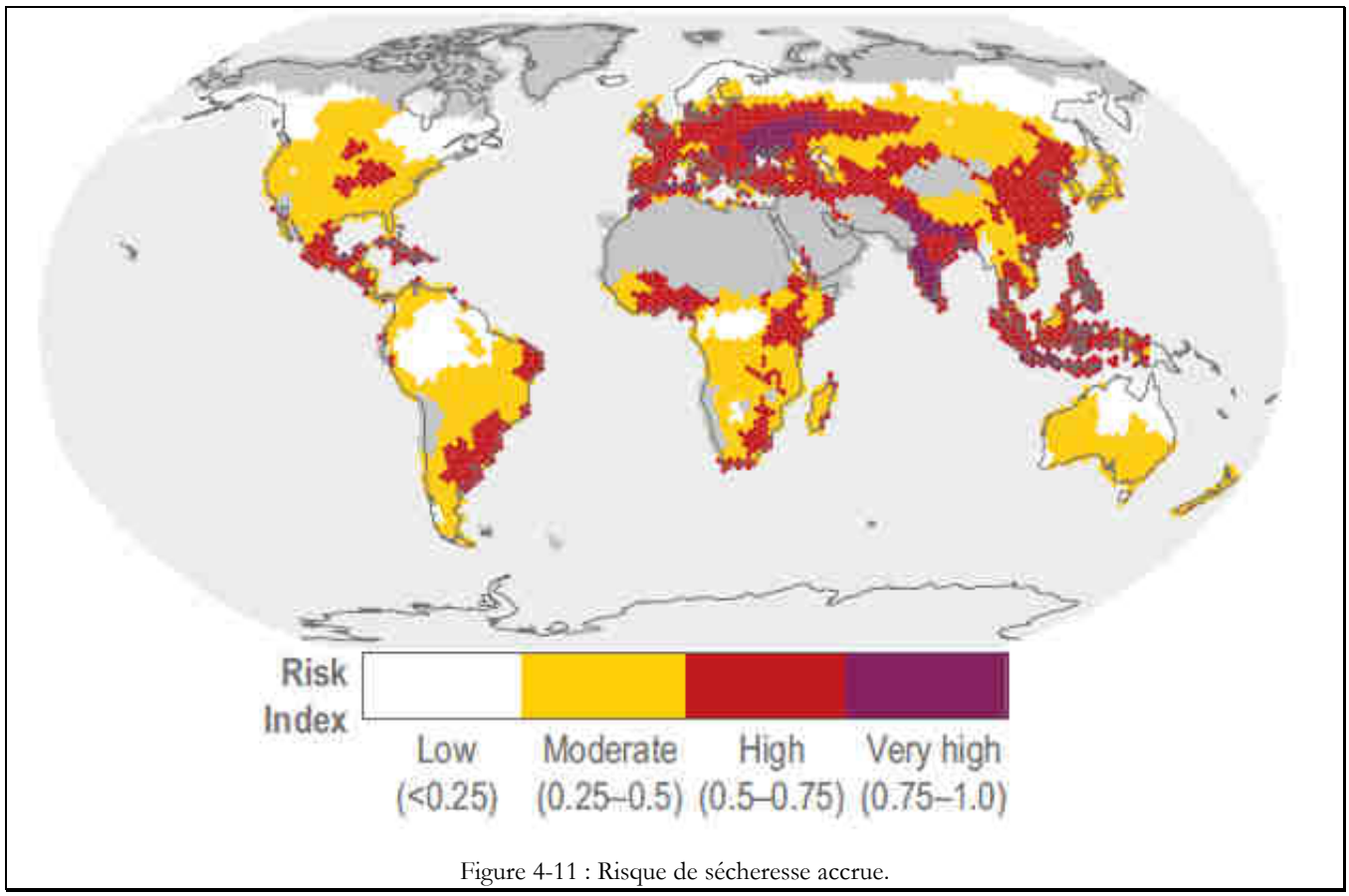
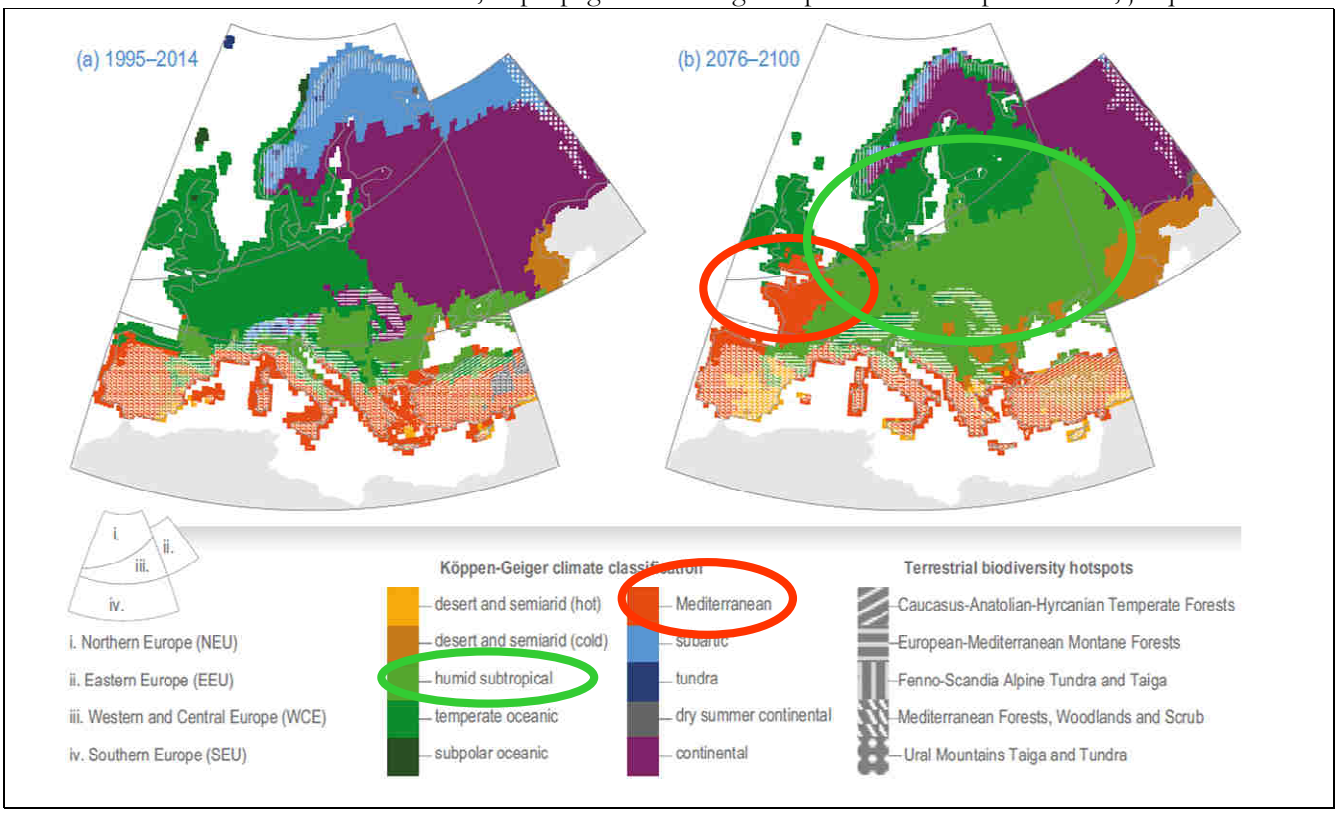


Figure 4-11 : Risque de sécheresse accrue.

4. 9 Changement du climat européen

Le climat méditerranéen va s'étendre sur toute la façade atlantique, qui serait réchauffée par le Golf Stream.

Le climat humide et chaud de Biaritz, se propagera sur une grand partie de l'Europe orientale, jusqu'en Russie.



4. 10 Elévation du niveau des mers

L'ensemble des scénarios annonce que le niveau des mers s'élévera de 20 à 80 cm d'ici à 2100 (Figure 4-12). Mais, même en cas de « neutralité carbone », le niveau des mers continuera à croître, de façon dramatique de 2 à 6 m dans 2.000 ans et de 13m dans 10.000 ans (Figure 4-13).

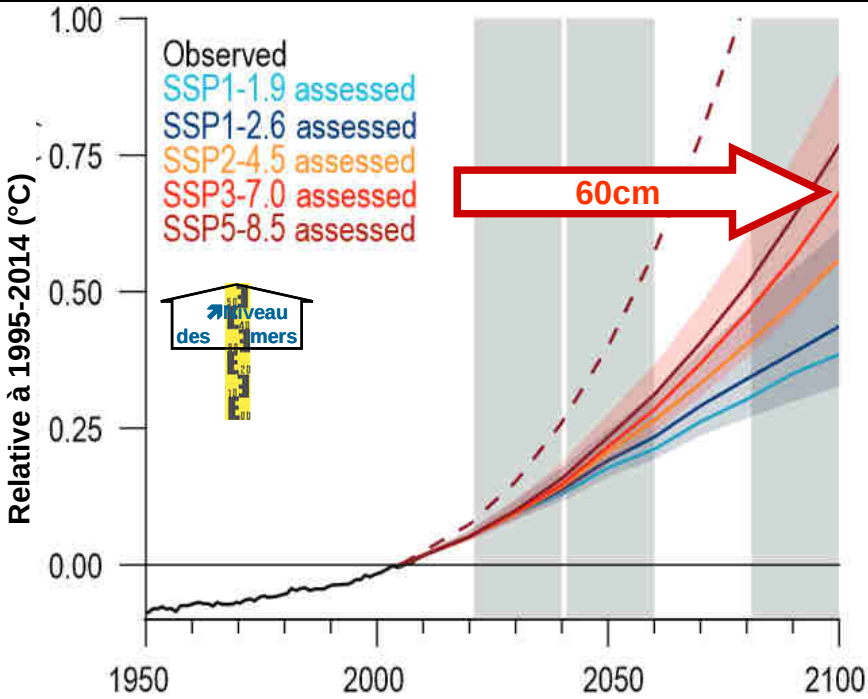


Figure 4-12 : Elévation séculaire du niveau des mers.

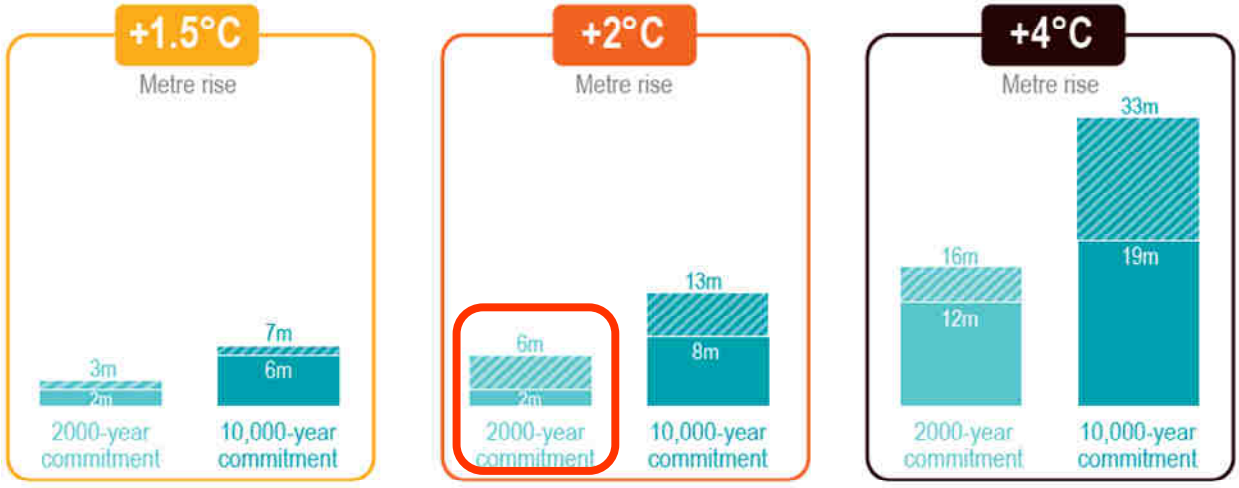


Figure 4-13 : Elévation inéluctable du niveau des mers.

Bien entendu cette élévation aura des conséquences humanitaire catastrophiques (perte de propriétés, émigrations forcées, forts risques de conflits).

5 Impact sur les écosystèmes, parades, adaptation

5. 1 Le processus d'analyse des dommages pour les écosystèmes

Le groupe 2 analyse les risques pour les écosystèmes, en pre nant en compte les dangers, leur vulnérabilité, leur exposition pour en déduire les dommages prévisibles. Ces risques sont analysés pour la flore, la faune et les humains.

Pour chacun de ces sujets, selon les divers scénarios, l'évolution temporelle est étudiée et les résultats fournis par région.

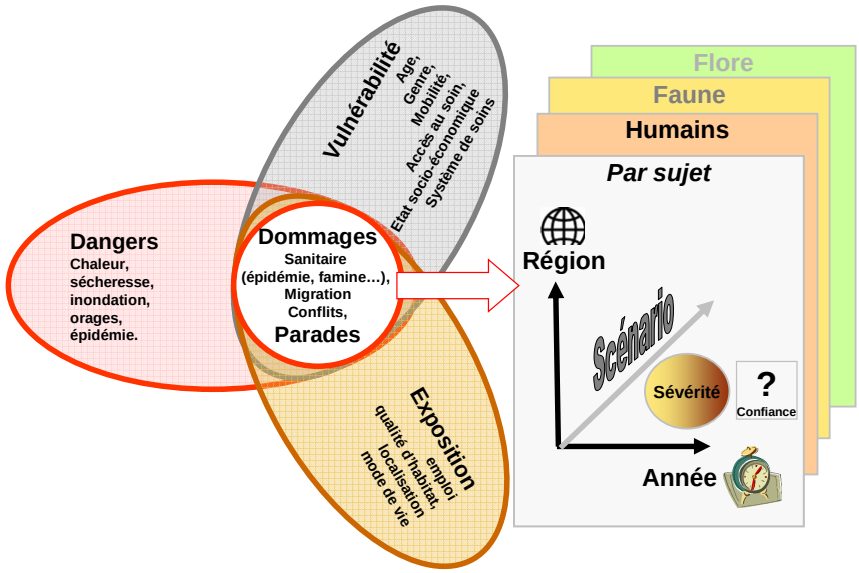


Figure 5-1.

5. 2 Exemple de problèmes créés par le dérèglement climatique

L'AR6 recense toute une série de dommages créés par le réchauffement climatique. Il cite, pour cela, les présentations de divers ouvrages qui les classent chacun à leur façon. Voici un exemple (Figure 5-2).

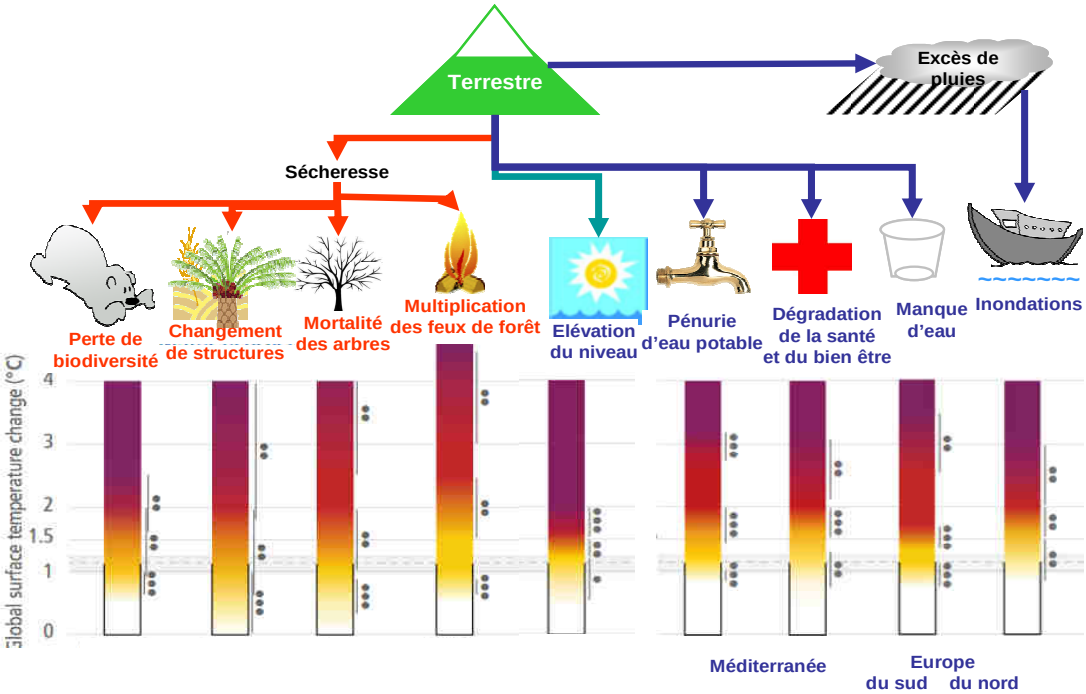


Figure 5-2 : Dommages notoires créés par le dérèglement climatique.

5. 3 Multiples classement des dommages et recommandations

Les dommages sont cités et classés dans différents tableaux, selon divers critères :

Le type d'écosystème, par exemple :

- ⇨ Mers ;
- ⇨ Occupation des sols ;
- ⇨ Industrie ;
- ⇨ Villes ;
- ⇨ Besoin d'eau douce.

La satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme :

- ⇨ Bien être ;
- ⇨ Nourriture : agriculture (évolution des types de cultures) et pisciculture,
- ⇨ Habitat,
- ⇨ Energie,
- ⇨ Mobilité,
- ⇨ Infrastructures,
- ⇨ Vie sociale et santé.

Nous présentons ci-dessous quelques extraits d'évolutions et de problèmes pour la falore, la faune et l'homme.

5. 4 Quelques évolutions notables

5. 4. 1. Changement de la biomasse marine

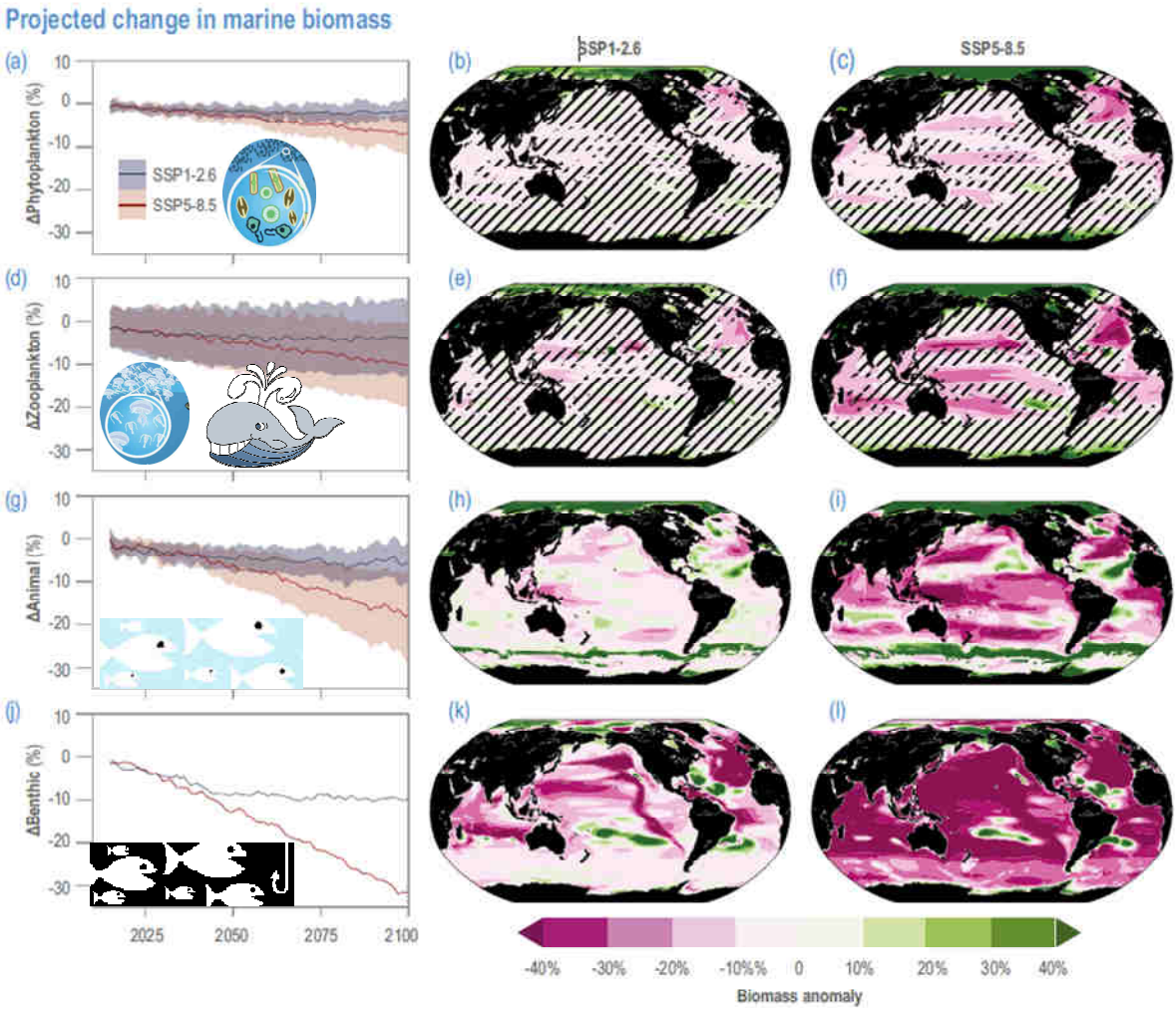


Figure 5-3 : Evolution prévue de la faune marine (© GIEC).

5. 4. 2. Extension de la forêt

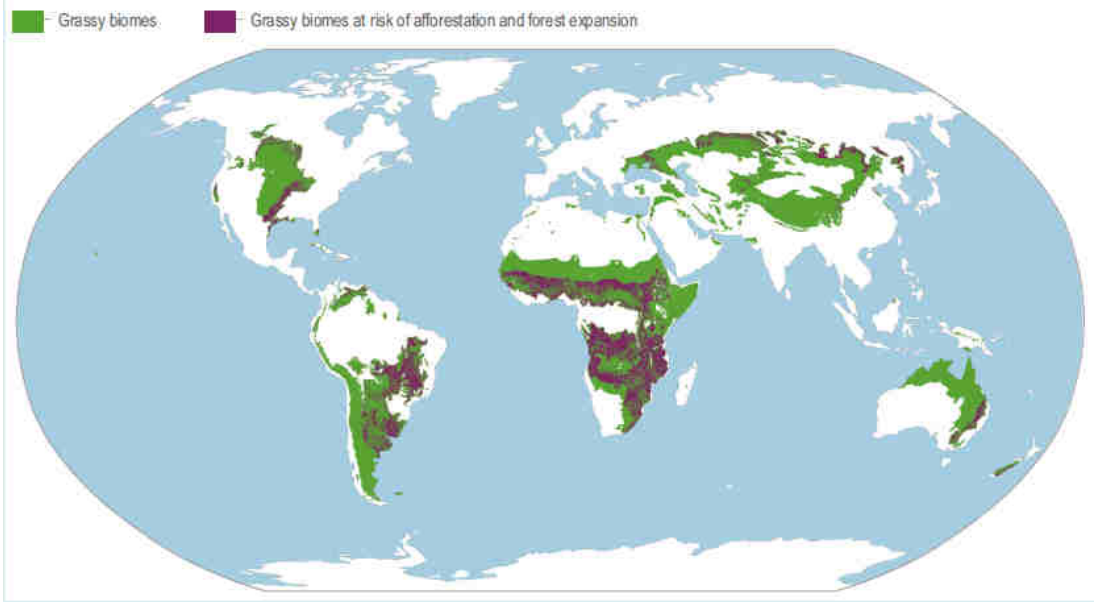


Figure 5-4 : Accroissement de la forêt au dépend de la savane et de la toundra (© GIEC).

5. 4. 3. Perte de biodiversité

Les évolutions climatiques entraîneront une perte significative de biodiversité, les espèces végétales et animales étant incapables de s'adapter à la vitesse inédite du changement climatique, ou des migrations d'espèces existantes.

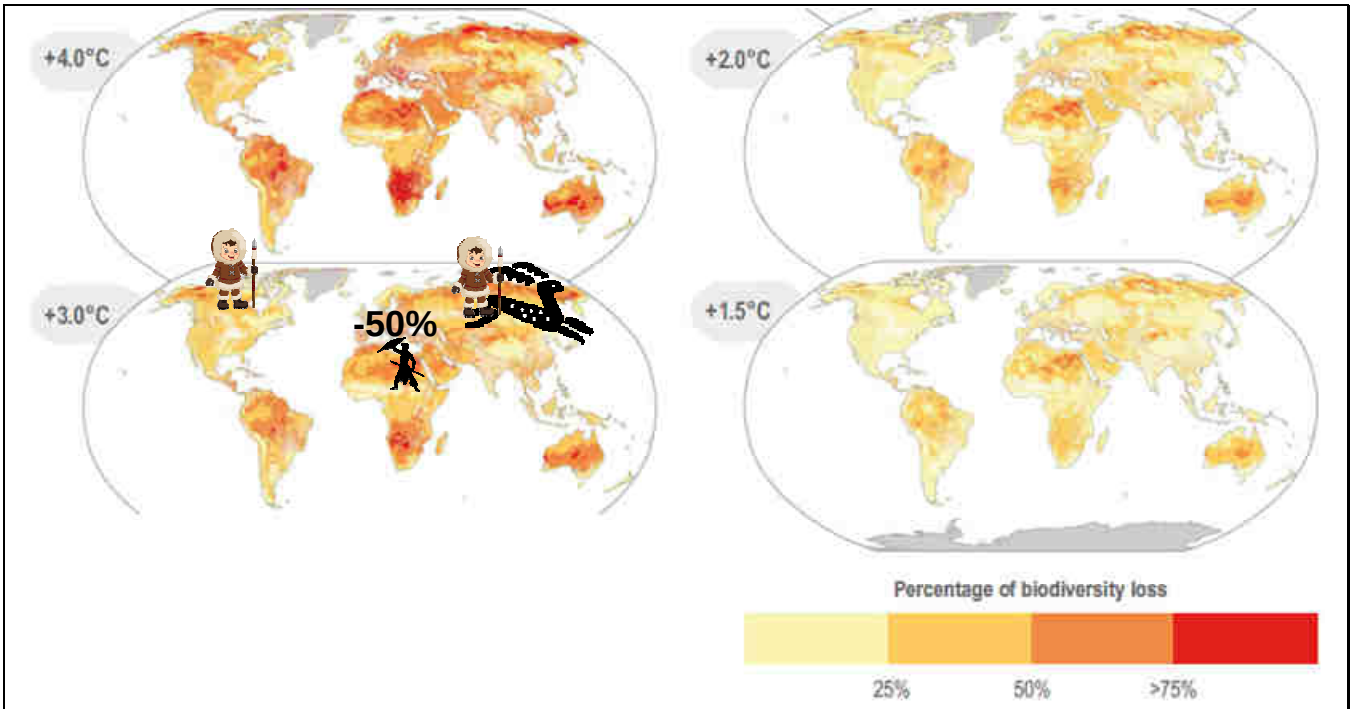


Figure 5-5 : Perte prévisible de biodiversité (© GIEC).

Par exemple la diminution de la biodiversité en Europe est détaillée Figure 5-6 et varie de 30% à 80%, selon les lieux et les espèces.

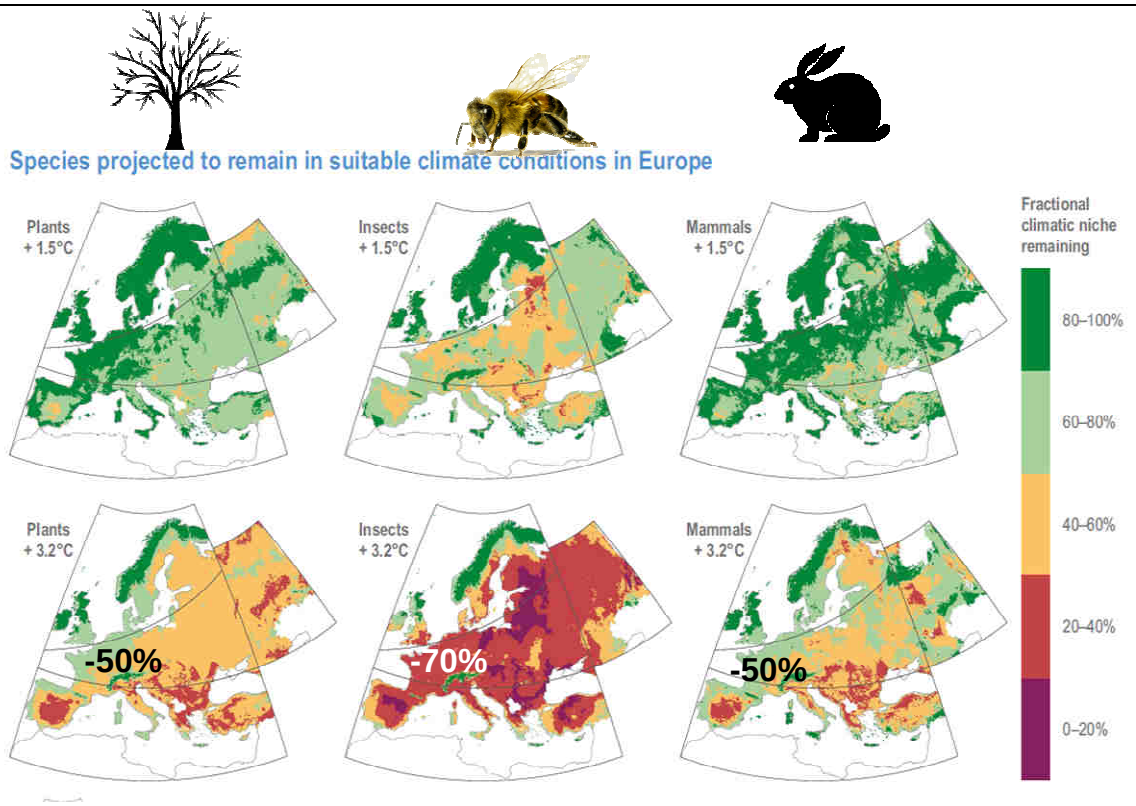


Figure 5-6 : Perte de biodiversité en Europe selon les espèces (© GIEC).

5. 4. 4. Dégradation des conditions de vie pour l'homme

Les hommes auront à subir une forte dégradation des conditions de vie, variable selon les régions, mais fortes notamment en Afrique ou en Asie.

Elles seront dues notamment à :

- ⇨ la chaleur moyenne et surtout extrême sur des périodes de plus en plus longues (Figure 5-7),
- ⇨ à la sécheresse accrue (Figure 5-8) ;
- ⇨ à la rareté accrue de l'eau ici,
- ⇨ aux risques d'inondation ailleurs.

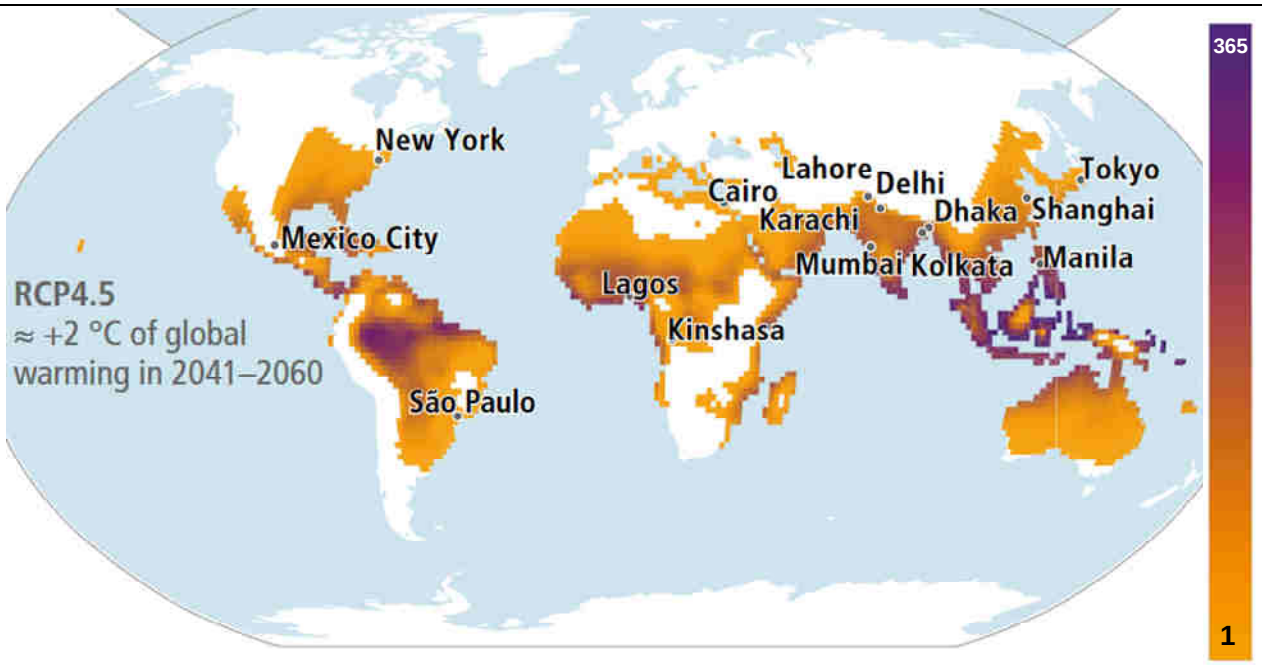


Figure 5-7 : Nombre de jours annuels où les conditions de température et d'humidité risquent d'être mortelles (© GIEC).

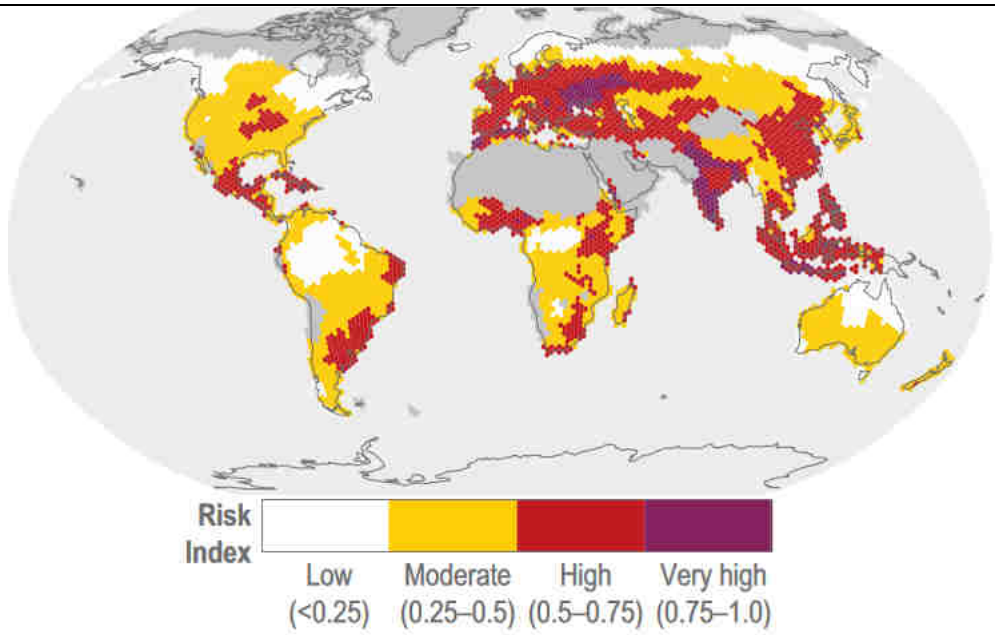


Figure 5-8 : Risque de sécheresse (© GIEC).

Ces changement entraîneront une vulnérabilité régionale des populations (Figure 5-9) et un accroissement de la mortalité de l'ordre de 0,2% à 0,3% (Figure 5-10).

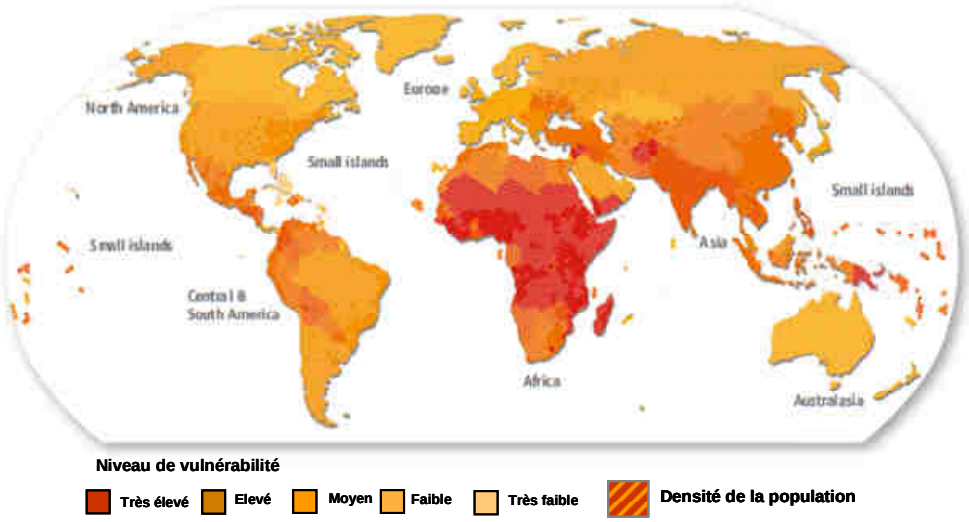


Figure 5-9 : Accroissement de la vulnérabilité des populations selon la région (©GIEC).

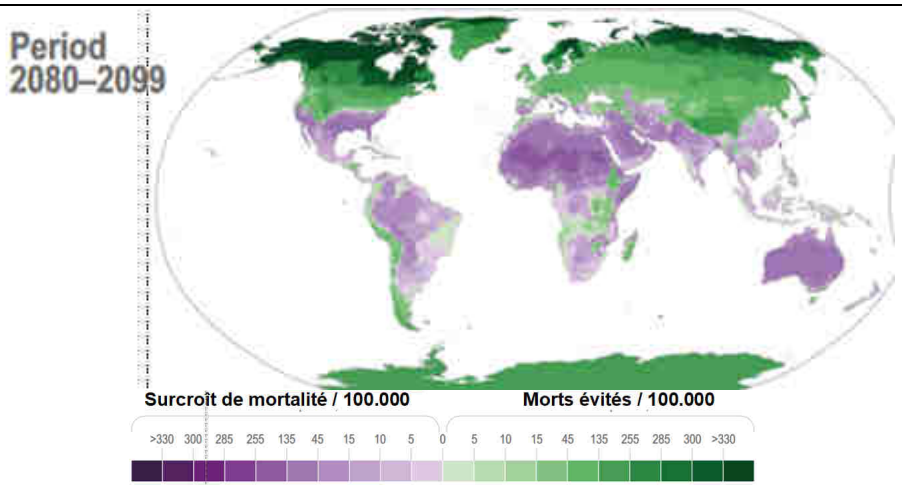


Figure 5-10 : Surcroit de mortalité dans un scénario d'augmentation de température de 4,5°C (©GIEC).

6 Atténuation

Le plus important serait d'atténuer puis d'éviter le réchauffement climatique, en évitant ses causes anthropiques.

6. 1 L'objectif de réduction des émissions par tête dans le monde

La Figure 6-1 : donne les émissions de CO_2 par tête dans divers états. La moyenne mondiale est de 4,4 t de CO2 par tête. C'est aussi le niveau d'émission des français.

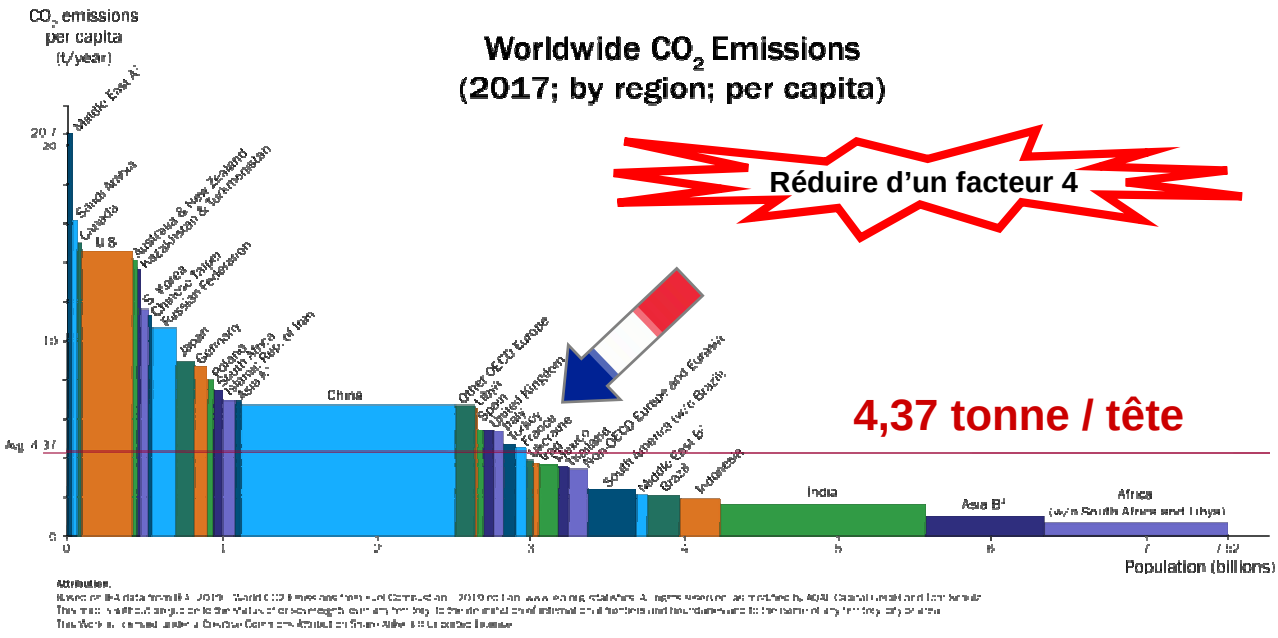


Figure 6-1 : Emissions mondiales de CO2 pat pays (© GIEC).

Les simulations montrent que pour limiter le réchauffement à 1,5°C, soit 0,5°C par rapport à aujourd'hui, il faudrait viser une réduction par 4 des émissions moyennes de gaz à effet de serre à horizon 2050, ce qui implique des changements considérables.

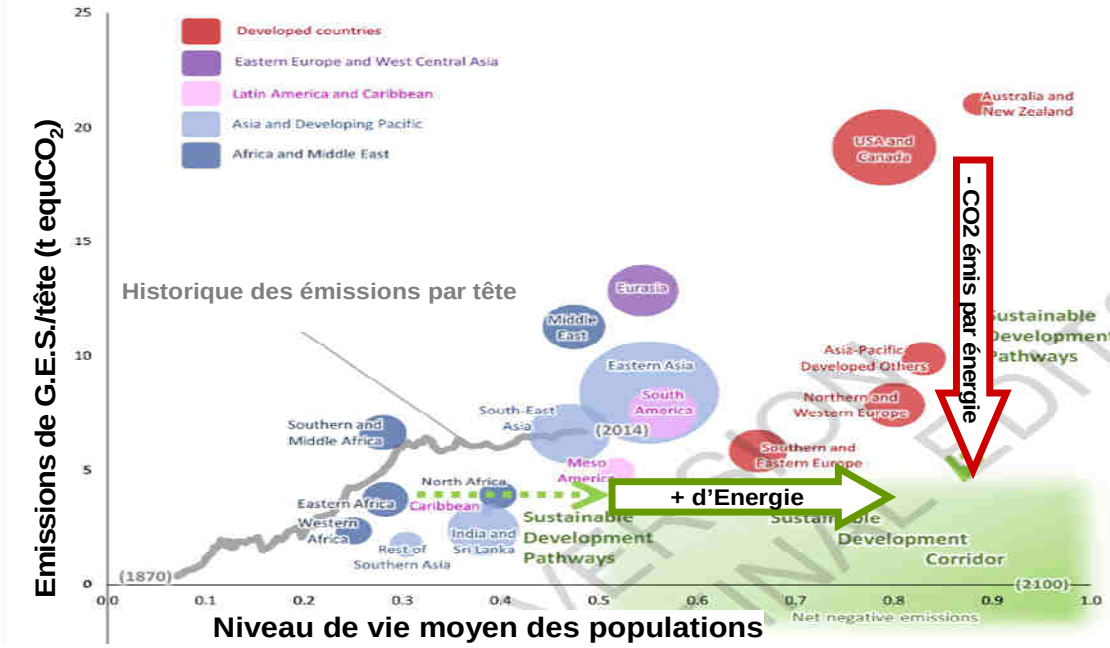


Figure 6-2 : Stratégie selon le niveau de vie.

Cependant, l'effort est différent selon les peuples :

- ⇨ réduire ses émissions pour les plus riches et
- ⇨ se développer sans accroître ses émissions pour les plus pauvres.

6. 2 Quelles stratégies d'atténuation des émissions de Gaz à Effet de Serre ?

2500 stratégies de réduction du réchauffement ont été modélisées par les chercheurs du GIEC :

- ⇨ 32 évolutions possibles énergétique et d'usage des sols &
- ⇨ 33 conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre.

Le GIEC classe ces stratégies en 5 types, peu conciliables entre elles, dans la mesure où il faudra opter en faveur d'investissements différents selon le cas, mais considérables.

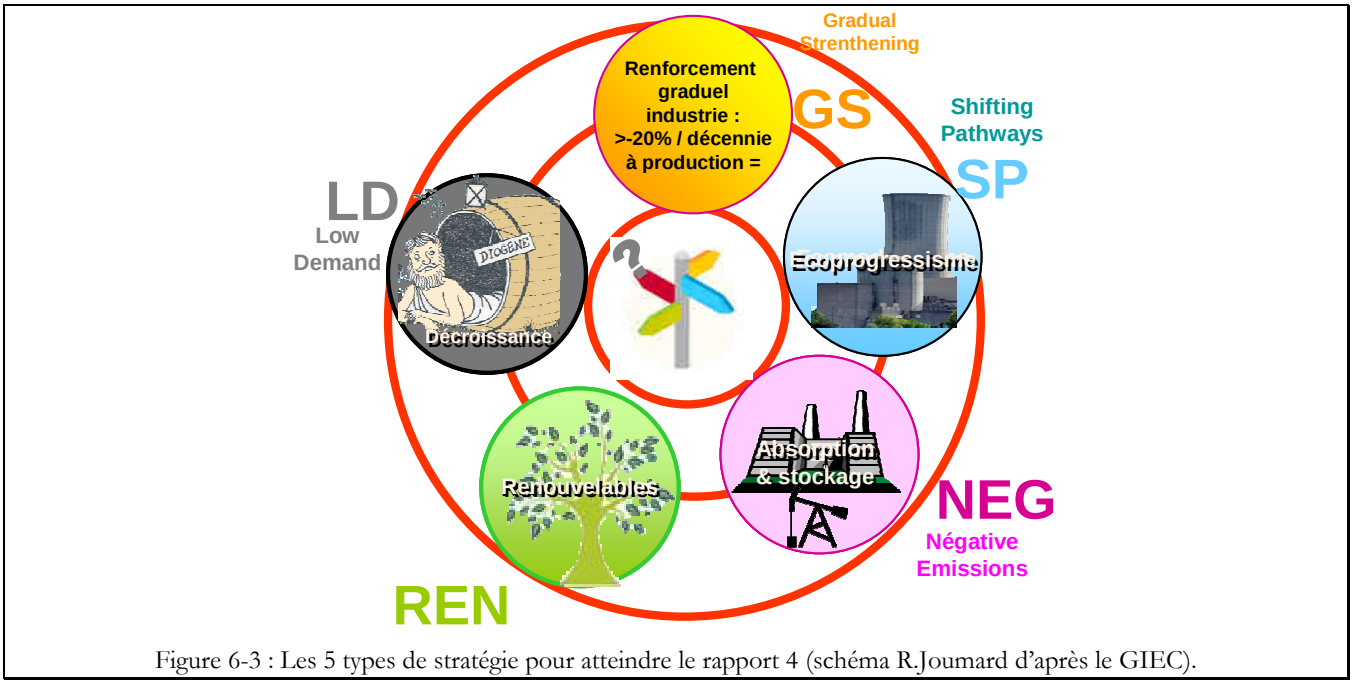


Figure 6-3 : Les 5 types de stratégie pour atteindre le rapport 4 (schéma R.Joumard d'après le GIEC).

Concernant les stratégies urbaines, le GIEC en cite 3 :

- ⇨ Décroître tous azimuts, via des évolutions spatiales et infrastructurelles ;
- ⇨ Electrifier via des sources primaires à 0 émission ;
- ⇨ Accroître le stockage du carbone et adopter des infrastructures vertes et bleues.

1200 scénarios sont pris en compte.

6. 3 Les freins limitant les solutions à la réduction des émissions de GES

Il est facile de faire des hypothèses de solution à la réduction d'émissions de G.E.S. pour en modéliser les efftets.

Il est plus complexe de les mettre en oeuvre, car on se heurte à des freins classables en 9 types (Figure 6-4).

Il concient donc de jauger chacune des possibilités théorique d'application face à chacun des ces types de freins.

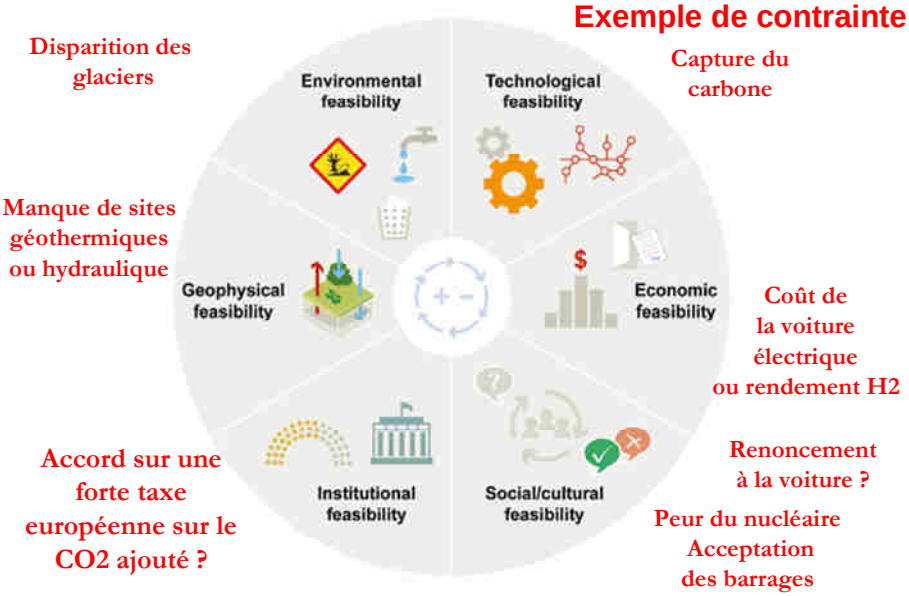
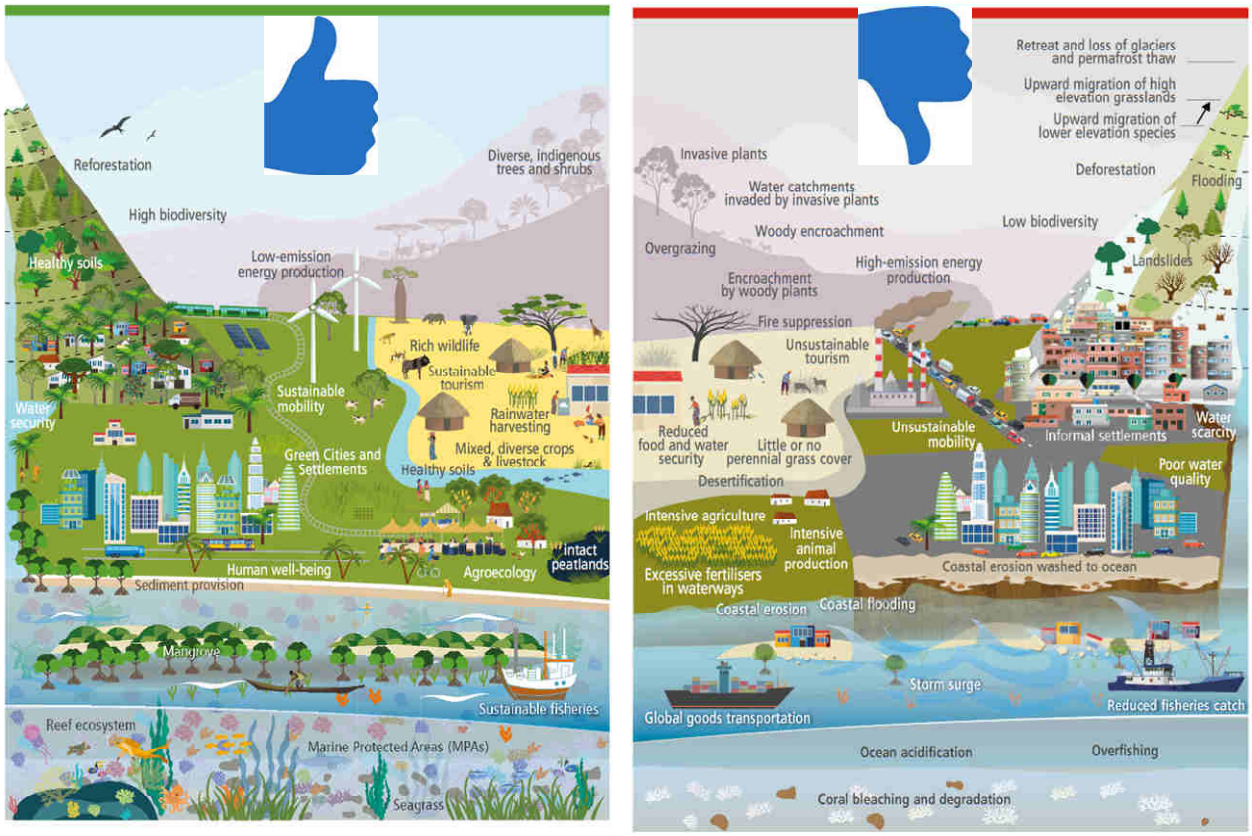


Figure 6-4 : Les 9 types de freins à la faisabilité des solutions de réduction des émissions de CO_2.

6. 4 Les solutions vertueuses selon le GIEC



6. 5 Classement des solutions de réduction des émissions de G.E.S.

Le GIEC présente des listes et des tableaux de solutions pour réduire l'énergie dépensée.

Le tableau qui nous a parru le plus intéressant par sa logique de classement est le suivant :

Activités				
Mobilité	= km-voyageur	* MJ/km-voyageur	* kg-CO2/MJ	
	Télétravailler	Se déplacer en vélo et en transports collectifs (ou navettes autonomes)	Véhicules électrifiés à batteries	
	Densifier les villes	Voyager et transporter en train, bateau		
	Une logistique optimisée	Véhicules légers, moins puissants, partagés	Véhicules à H2	
	Vacances locales	Réduire la vitesse		
Fabrication	= quantité de biens	* kg de matériau / bien	* kg CO2 / kg de matériau	
	Réduire la consommation	Des objets et carrosseries en plastique	Fabriquer en bois	
	Partager l'usage des biens	Fabriquer recyclable	Améliorer les pratiques Industrielles	
	Réduire les emballages, du vrac	Réparer	Réduire l'énergie pour produire l'acier	
Construction	= m2	* t-matériaux/m2	* kg-CO2/t-matériau	
	Logements plus petits	Economiser les matériaux !	Construire en bois	
	Partager les logements entre générations et entre familles		Réduire le ciment au CaCO3	
	Des espaces partagés			
Confort thermique	= ΔT * m3	* MJ / m3	* MJ / ΔT	* kg-CO2 / MJ
	Réduire les espaces de vie	S'habiller différemment	Renforcer l'isolation	Utiliser l'énergie solaire
	Ajuster chichement les températures ambiantes	Adapter les horaires de travail	Optimiser l'architecture	Utiliser des pompes à chaleur
		Arborer, verdir		Privilégier le chauffage collectif (avec compteur)
Nutrition	= calories consommées	* calories dépensées /consommées	kg-CO2-eq /calorie dépensée	
	Réduire la consommation au strict besoin	Choisir des nourritures peu énergivores	Améliorer les pratiques agricoles	
	Réduire le gaspillage avant et après achat	Renoncer à la viande et au lait, pour des produits protéinés	Acheter local	
Eclairage	=lumen	* kWh/lumen * CO2/kWh		Code couleur
	Des détecteurs de présence + temporisations	Des lampes à LED		Contraindre
	Une architecture lumineuse			Investir
	Supprimer l'éclairage inutile			Révolutionner

Figure 6-5 : Classement des mesures envisageables pour réduire l'énergie dépensée (GIEC).

Cependant, l'objectif ne doit pas être essentiellement, comme le décressionistes le pronent, de réduire l'énergie consommée, mais il est fondamental aussi et même surtout de réduire les G.E.S émis pour obtenir l'énergie nécessaire. En effet, les freins socio-culturels seront bien moindres.

En plus des solutions pour réduire l'énergie consommée, dans le tableau suivant., je propose le même type de classement pour réduire les émissions de CO2 pour produire de l'énergie.

Energie produite sans CO2	= MJ/kWh	* kg-CO2/ kWh	
(ajouté au tableau du GIEC précédent).	Accroître la taille des éoliennes	Stocker **économiquement** l'électricité aléatoire : (batteries, combustible : H_2, CH_4)	Utiliser l'énergie solaire stockable économiquement
	Maximiser le rendement photovoltaïque		Stocker **économiquement** l'énergie éolienne
	Optimiser le rendement des génératrices des centrales à gaz (CCG)	Expérimenter des processus économiques de bioélectricité et de méthanisation avec CCS	Développer l'énergie hydraulique et les STEP (là où c'est possible !)
	Des centrales nucléaires de 4ème génération	Capter le Carbone à la source le transporter et l'enfouir économiquement ou l'utiliser	Utiliser l'énergie nucléaire
	Réduire les pertes réseau (regroupements)	Se chauffer au bois, plutôt qu'aux combustibles fossile en gérant les forêts.	Explorer les bons sites de géothermie

Code couleur
Décroissance
Investir davantage
Moderniser
Découvrir/Expérimenter

Le GIEC fournit aussi des listes de mesures susceptibles de diminuer le réchauffement climatique, à condition toutefois que la confrontation avec les freins qui n'en limite pas l'application. La couleur indique comment le coût global de son application se situe par rapport à la solution actuelle. La taille de la barre indique le gain espéré de cette

mesure. Je propose que selon la règle des 20-80, nous nous concentrions sur les 20% des mesures indiquées comme étant susceptibles d'avoir une efficacité notables.

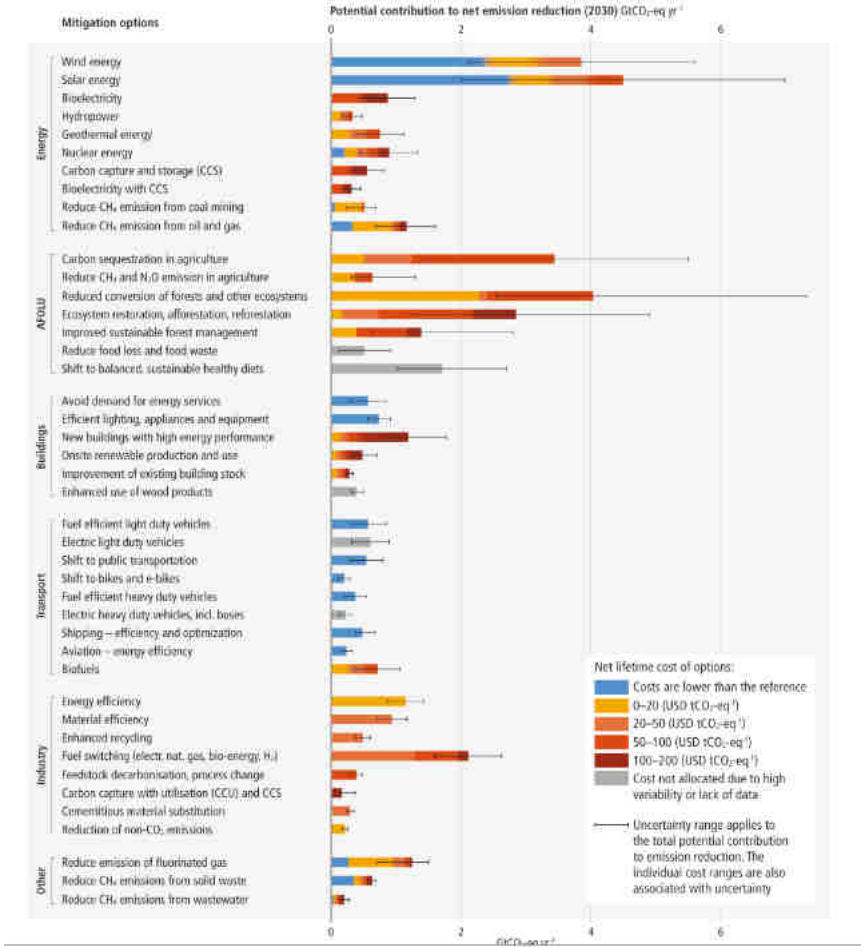


Figure 6-6 : liste des mesures proposées par le GIEC.

Nous analyserons la faisabilité des solution énergétique au chapitre suivant

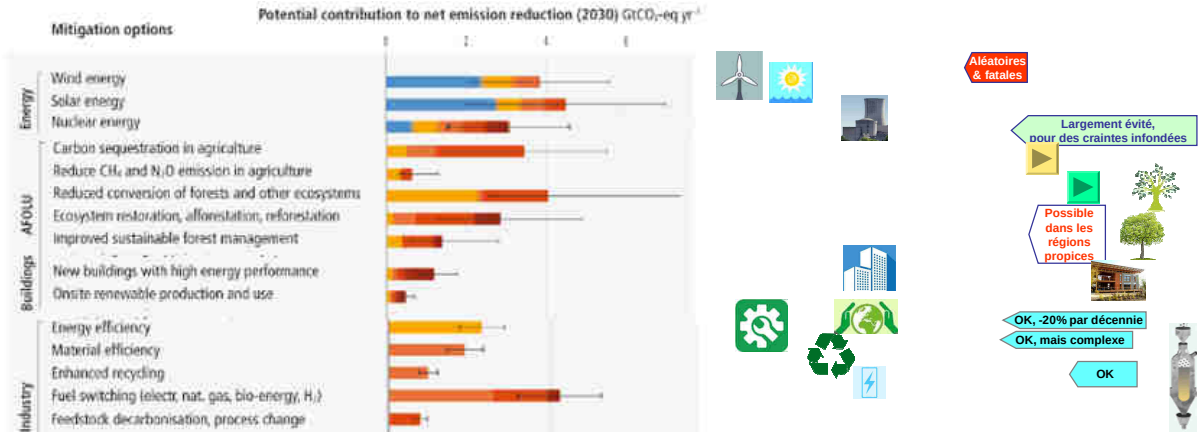


Figure 6-7 : Sélection des mesures proposées par le GIEC, évaluées comme efficaces.

6. 6 Comment capturer plus CO2 par l'agriculture (selon l'INRA)

Un des concepts de base annoncé est la reforestation et aussi de la limitation de l'élevage et donc des prairies fatalement au profit de cultures protéinées avec comme objectif de nourrir plus de personne. Rappelons cependant que favoriser accroître la population reste une démarche à éviter.

Suite au changement climatique l'extension de la forêt tropicale va avoir lieu naturellement au dépernd de la savane et sde la forêt nordique au dépend de la toudra. Mais en revanche, dans la forêt française qui occupe un taux

remarquable de la supericie (près d'un tiers), il existe noatble que certaines espèces, comme l'érable qui vont dépérir de maladie à cause du réchauffement clmatique et dès lors que ce qui devrait être des puits devienne t des sources.

Voyons quels sont les propositions de l'INRA concernant l'affectation des terrains (Séquestration du carbone dans les sols agricoles en France, *ÉTAT DES CONNAISSANCES ET PISTES DE RÉFLEXION*), pour séquestrer au mieux 2% du CO_2 émis en France.

L'INRA propose de :

- ⇨ réduire la transformation des espaces naturels (5.500 ha contre 20 000 ha actuellement) ;
  - ⇨ en urbanisant sur des espace déjà artificialisés ;
  - ⇨ en utilisant plus de logements vacants ;
- ⇨ Planter plus de haies (solde de – 8.000 km/an) ;
- ⇨ **d'accroître l'élevage pâturant** (3 à 5 MtCO2/an = 1% des émissions de CO2).
  - ⇨ au lieu de mettre en culture 40.000 ha/an de prairie ;
- ⇨ de conserver des bandes enherbées (dans la vigne),
- ⇨ d'assurer un couvert végétal permanent, par des rotations allongées et des légumineuses,
- ⇨ d'épandre de la matière organique, produite par photosynthèse (lisier, fumier, digestat, résidus de culture).

Notons que ces propositions sont contraires au suggestions de réduction de l'élevage non intensif.

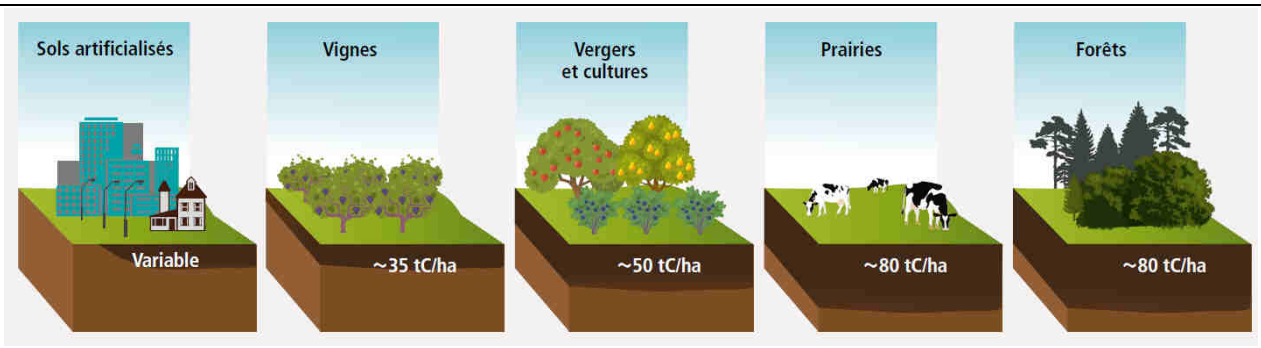


Figure 6-8 : Aborption du CO2 par les sols, selon la nature de leur usage (© INRA).

6. 7 Capter le CO2 lors des combustions

Concernant la part importante de CO2 émise lors des productions industrielles, pour chauffer ou à l'issue de transformations (cimenteries, production de métaux…), la proposition du GIEC est de :

⇨ capter le CO2 soit avant la combustion,soit lors de la combustion, puis lavage des fumées, soit par oxycombution.

⇨ transporter le CO2 vers un site capable de l'aborber, si possible liquide, par oléoduc, sous pression de 6 bars ;,

⇨ d'enfouir les CO2 sous pression, soit dans des sols poreux (bazalte), soit accessoirement dans des puits de pétrole,soit de l'utiliser pour qulques rares usages.

La mise en œuvre de ces solutions à été faite à titre expérimental, voire publicitaire par de grandes entreprses. Dans la pratique elles se révèlent d'un coût très élevé qui impliquerait pour q'elles soient pratiquées systématiquement qu'il existe une taxe carbonne d'au moins quelques centaines d'euro la tonne. L'ensemble des pays industrialisés n'en prennent pas le chemin.

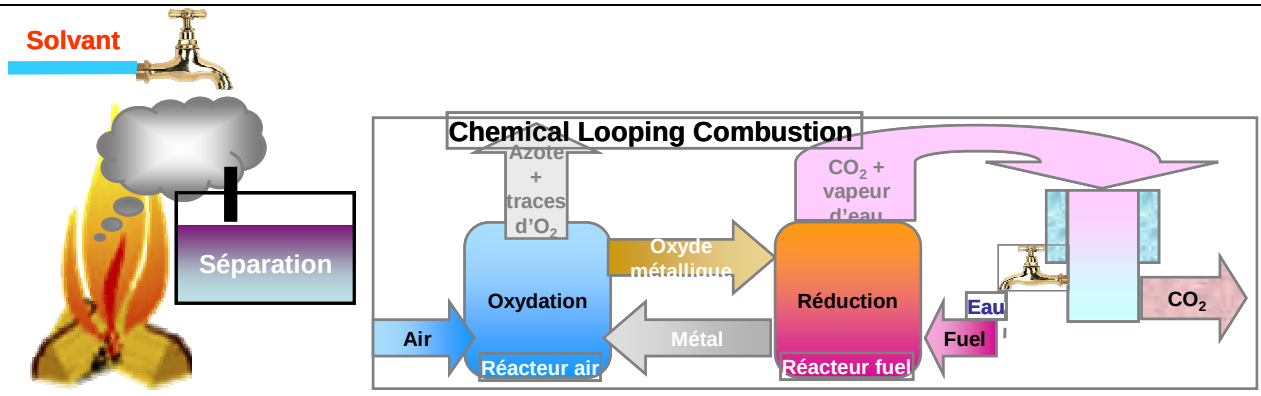


Figure 6-9 : Scémas de procédés de captage du CO_2 lors de la combustion.

6. 8 Fabriquer des métaux en émettant peu de carbone

La production de métaux et notamment par le procédé conventionnel de haut-fourneau, émet plus de poids de CO_2 que de poids de métal produit. Pour réduire les émissions de CO2, il est consellé d'utiliser un four électrique et une réduction au gaz. La réduction chimique des oxydes de fer par du gaz produit cependant du CO_2.provenant de carbone contenu dans le gaz. La solution écologiqument idéale est d'utiliser de l'hydrogène à la place du gaz Economiquement, cependant, le rendement limité à 70% de l'hydrolyse, pour produire de l'hydrogène qualifié de vert (ou bleu !) et l'amortissement de l'installation d'hydrolyse, doublent le coût du gaz de réduction.

Néanmoins, cette solution a de l'avenir à condition qu'il existe une taxe carbone conséquente (>100€ ?).

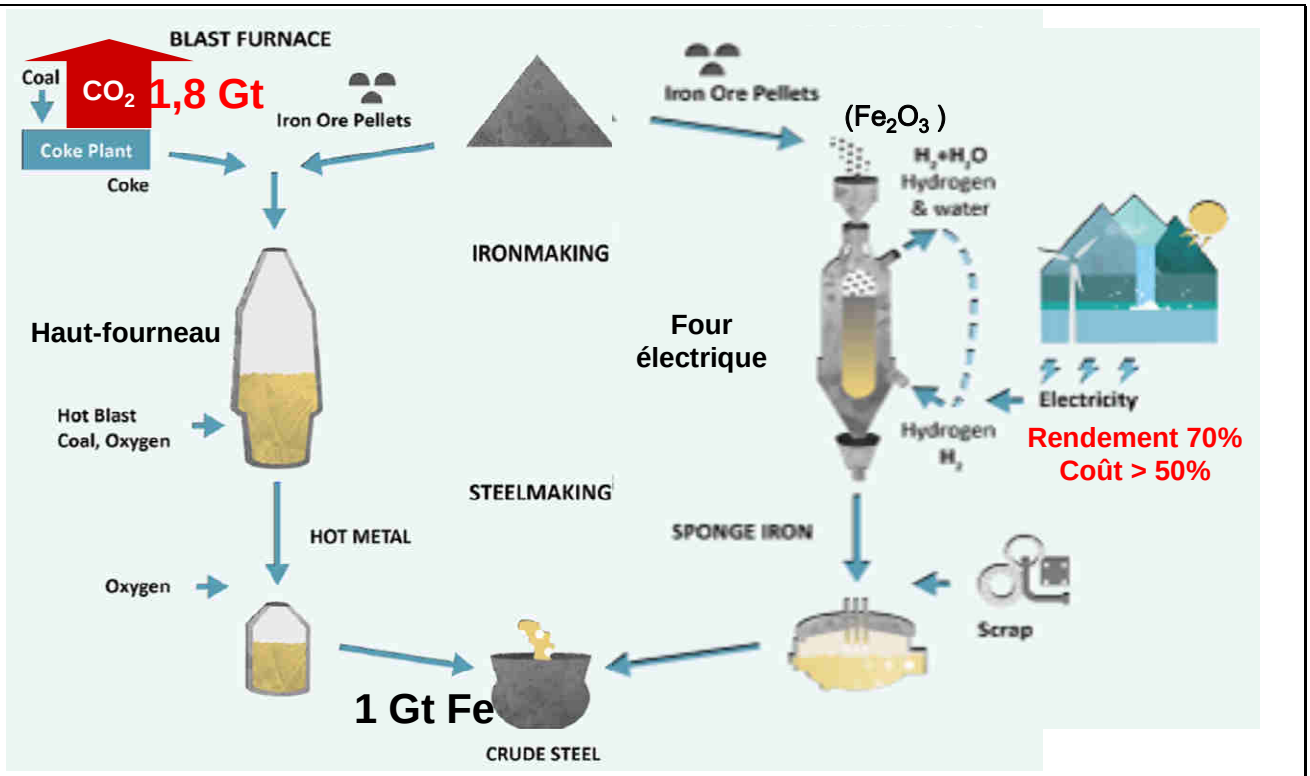


Figure 6-10 : Fabrication de fer dans un four électrique à hydrogène.

6. 9 Prévision du GIEC sur la réduction des émissions de CO_2 résultantes en 2050

Le GIEC présente les économies estimées possibles en 2050 dans les différents secteurs économiques, ainsi que l'impact de l'accroissement de la production életrique.

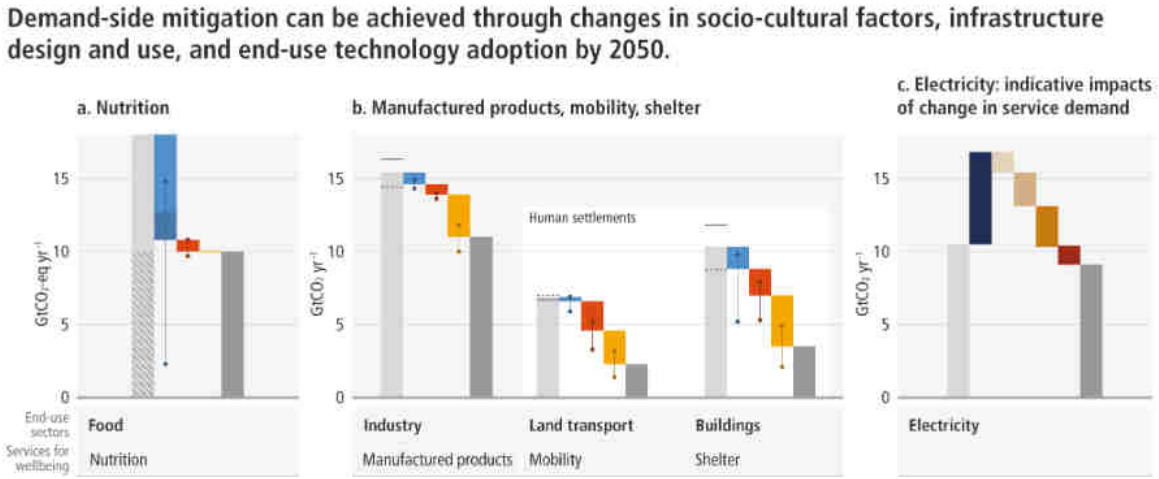


Figure 6-11 : Solutions d'atténuation proposées par le GIEC.

Actuel : ■, **Facteurs socioculturels : ■, Usage d'infrastructures : ■, Evolution technologique :.■**2050 :.■

Industrie ■, Transport terrestre : ■ Bâti : ■ Gestion de l'équilibre réseau : ■

Ces données représentées sur le graphique en forme de barres donnent la 6. 9. La 1ère ligne représente l'état actuel, la 2ème les évolutions et la 3ème le résiltat en 2050. La diminution de CO_2 ainsi présentée permet d'atteindre un facteur 1,8, loin encore du facteur 4.

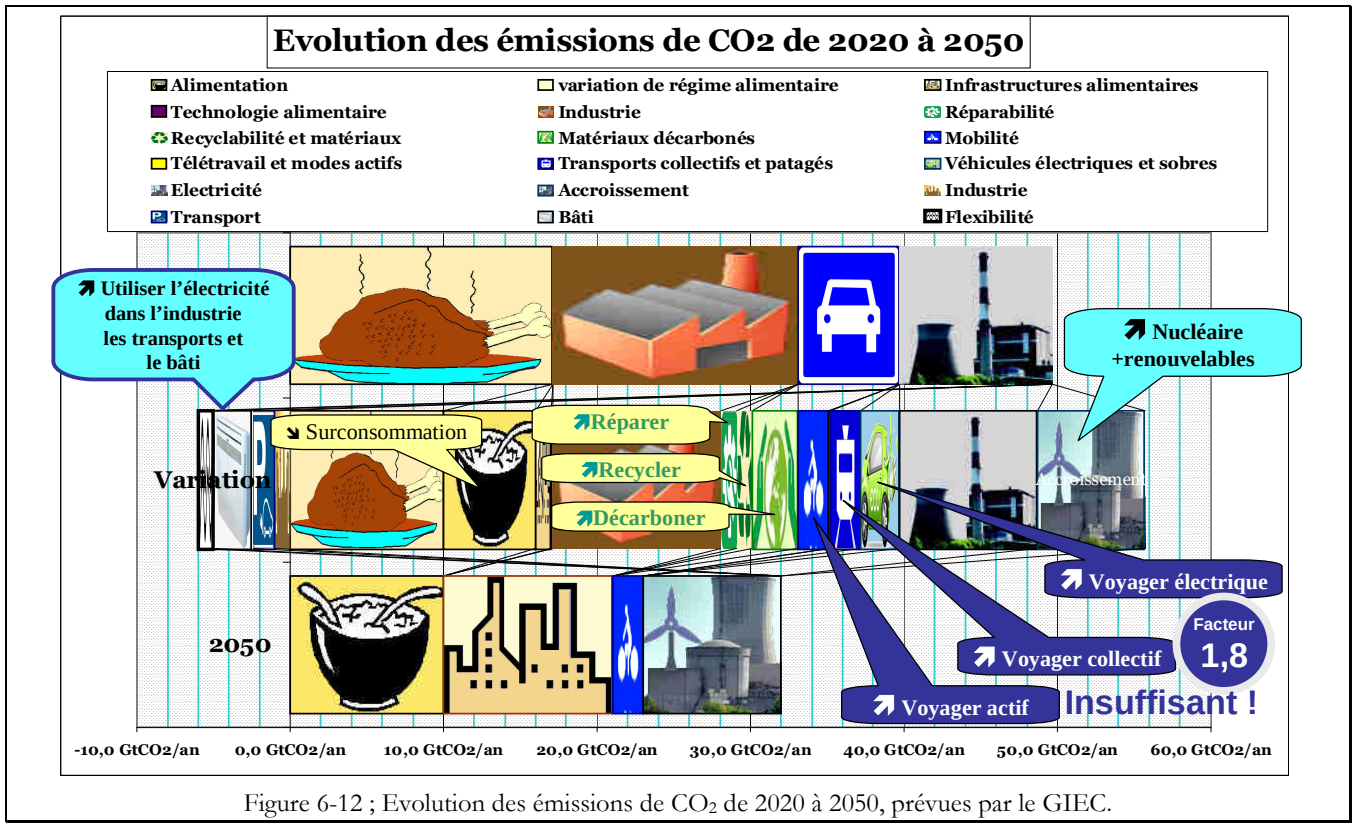


Figure 6-12 ; Evolution des émissions de CO_2 de 2020 à 2050, prévues par le GIEC.

Naturellement, les évolutions peuvent être poursuivies au-delà de 2050. Des représentations de diminutions plus optimistes existent pour atteindre 0 émissions plus ou moins tôt, selon les scénarios. Cependant les solutions proposées par le GIEC me semble très hypothétiques.

7 Atteindre un facteur 4 de réduction des émissions de carbone grâce à l'utilisation d'électricité

7. 1 Viser l'électrification généralisée de l'énergie

Le GIEC propose largement le recours à l'électricité renouvelables ou au nucléaire.

« Tous les scénarios inférieurs d'augmentation inférieure à 2°C impliquent une électrification des bâtiments, des transports et de l'industrie. » (selon le CITEPA). Détaillons cet objectif[v].

Cependant, l'usage des renouvelables se heurte à l'intermittence aléatoire des renouvelables impliquant :

⇨ soit un stockage à grande échelle, au coût excessif probablement jusqu'en 2050, même si le coût de la capacité des batteries est divisé par 2 chaque décennie, grâce aux évolutions technogiques (batteries au sodium, anode en titane et cathode en graphène) ;

⇨ soit une reprise en secours sachant qu'il n'y a guère que les centrales à gaz qui ont la réactivité désirable.

C'est ce que nous allons démontrer.

7. 2 L'exemple français de sobriété en CO_2 de la consommation électrique

Considérons la consommation électrique du système électrique européen (sur app.electricitymaps.com/map).

Sur une carte historique de 2017, on voit nettement les performance des états. La Norvège et la Suède émettent très peu de CO2 (35g/kWh) grâce à la part importante de la source primaire hydraulique. La Suisse et la France en émettent peu (67g/kWh), comparé à l'Allemagne qui en émet fréquemment jusqu'à 700 la Pologne jusqu'à 900.

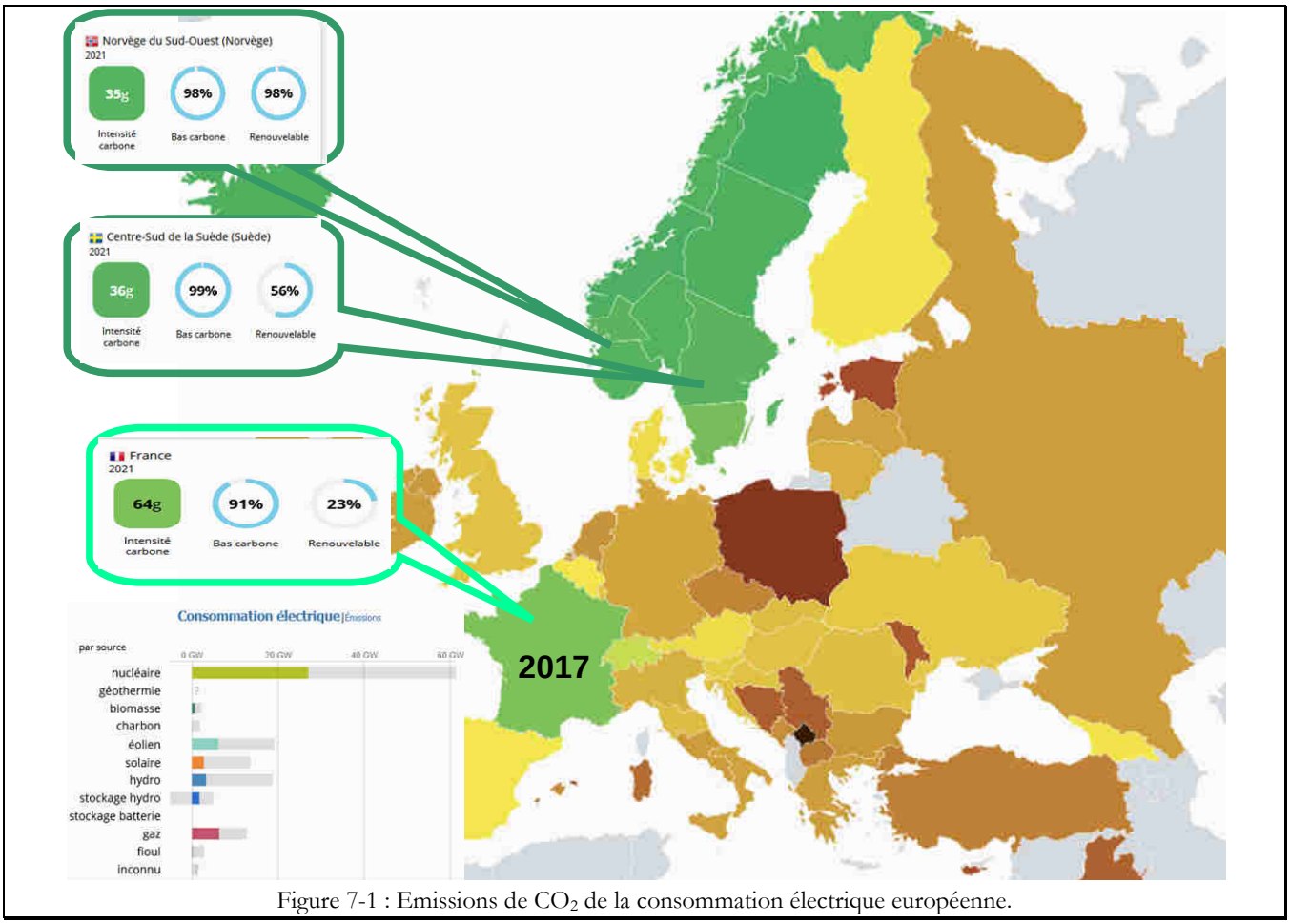


Figure 7-1 : Emissions de CO_2 de la consommation électrique européenne.

Nous explicitons, ci-dessous, l'exemple du réseau français exemplaire en 2002, sachant que sa sobriété carbone s'est dégradée dans un rapport de l'ordre de 2 à 3, depuis (conséquence de l'arrêt de 3 réacteurs nucléaires), alors que le coût de l'électricité s'est envolé (taxe CSPE de 30% pour financer essentiellement les renouvelables, envolée des prix du gaz, pénurie de puissance impliquant des effacements de quelques heures pour éviter les coupures généralisées).

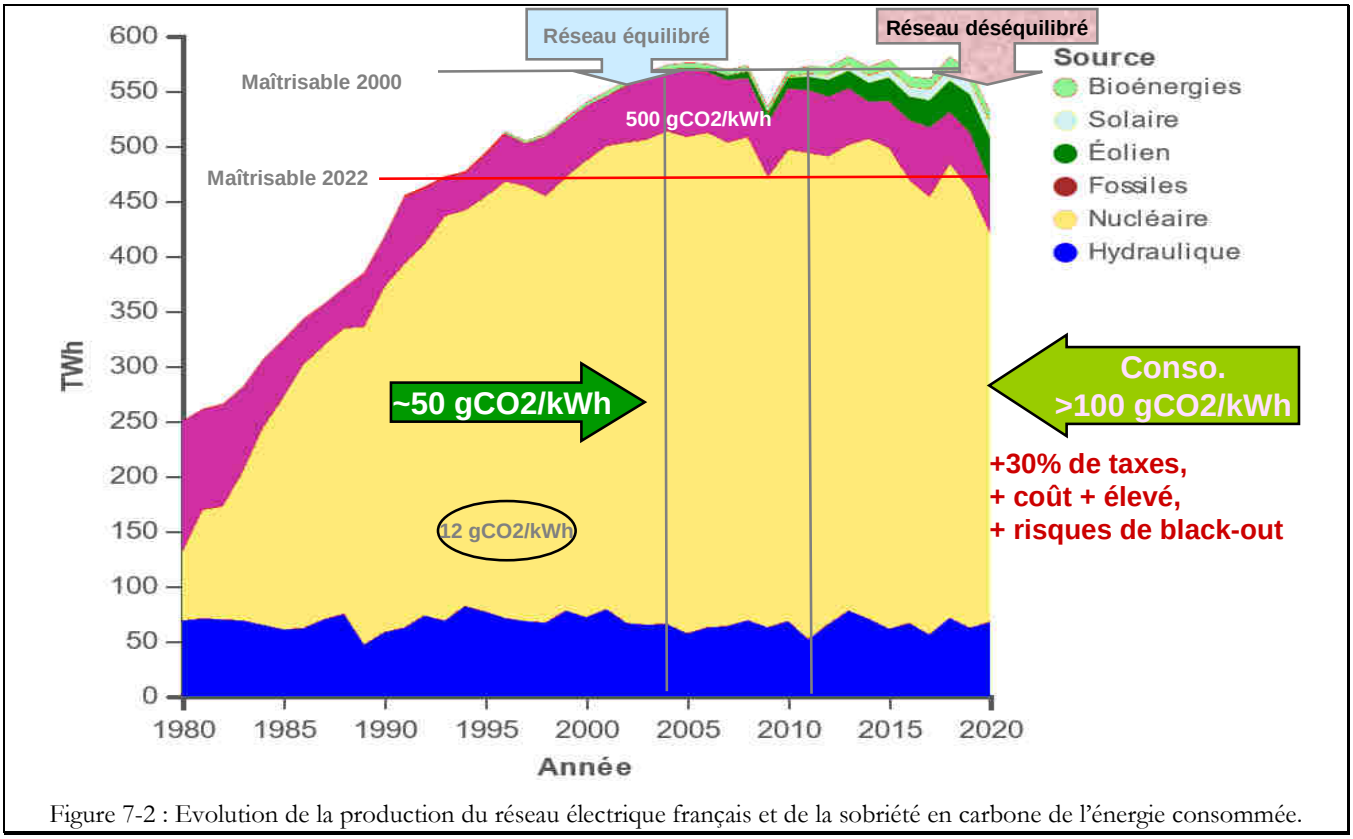


Figure 7-2 : Evolution de la production du réseau électrique français et de la sobriété en carbone de l'énergie consommée.

Considérons la part des sources prmaires de l'énergie consommée en France. La Figure 7-3 montre que la moitié environ de l'énergie est fournie par l'électricité et l'autre moitié est un combustible carboné.

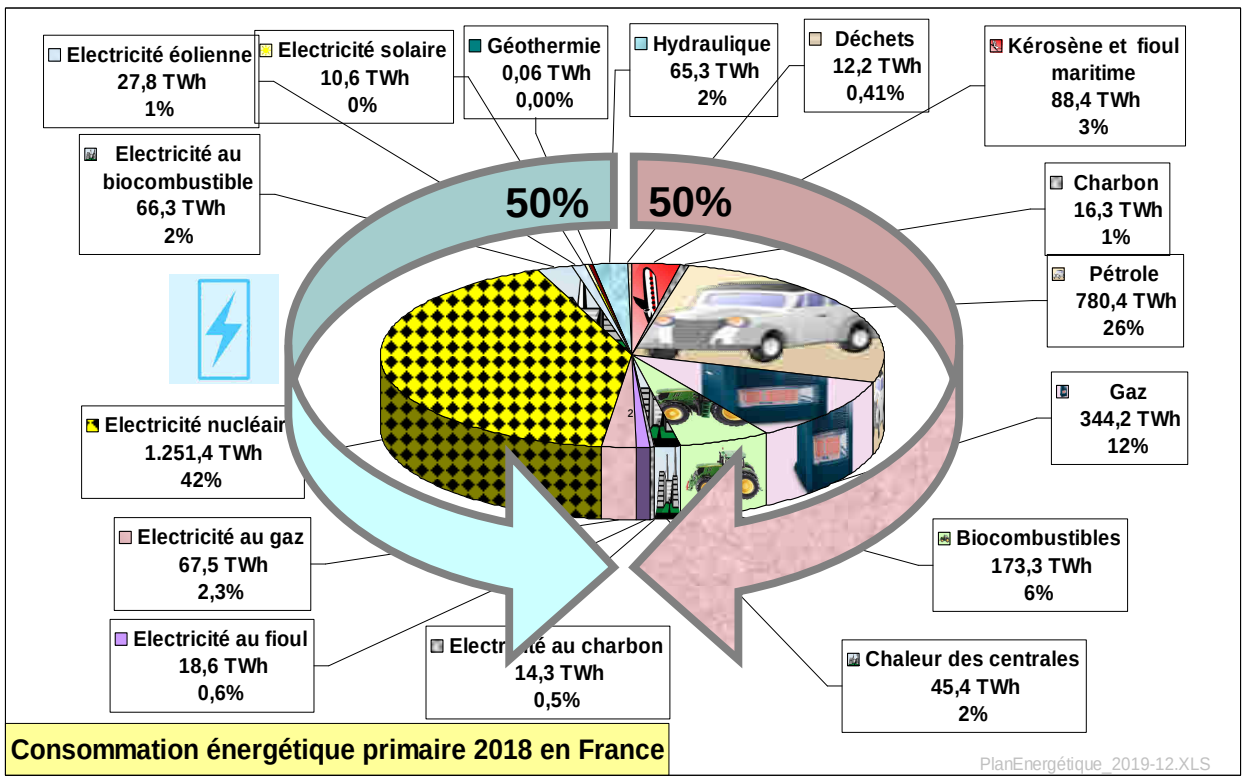


Figure 7-3 : Sources primaires d'énergie en France.

En revanche l'énergie d'origine électrique émettait, en 2010, 15 fois moins d'émissions de CO_2 que l'ensemble des autres sources, à dépense énergétique égale (Figure 7-4). Et comme nous allons l'expliquer, cette qualité pourrait encore être accrue, non pas en augmentant la part des renouvelables aléatoirement variables, mais en réduisant leur part au profit du nucléaire.

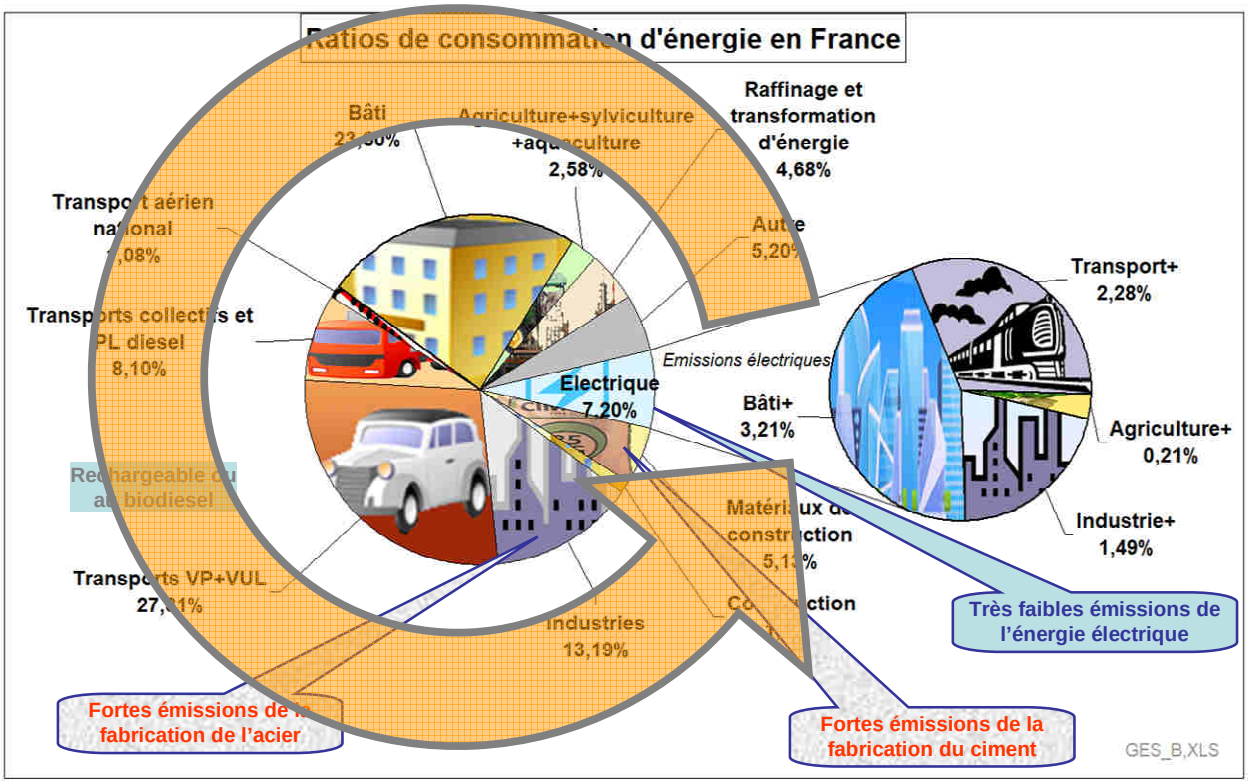


Figure 7-4 : Part des émissions de CO2 émis par l'usage de l'énergie selon la source (secondaire).

La raison de ces faibles émissions est rappelée par le diagramme de la Figure 7-5. En cas de recours à une source intermittentes et aléatoire, la garantie de fourniture exige le recours à une source pilotable et réactive comme le gaz ou ce qui est pire le charbon, la lignite, généralement brûlée à l'étranger (Allemagne, Espagne…).

La disponibilité d'une source est le **taux de charge** = production réelle / production continue à pleine charge.

Ce taux τ vaut, selon l'emplacement, environ pour le solaire : 15%, pour l'éolien terrestre 22% et marin 40%.

L'énergie requise en secours est liée au taux de coïncidence entre le besoin et l'indisponibilité (1-τ).

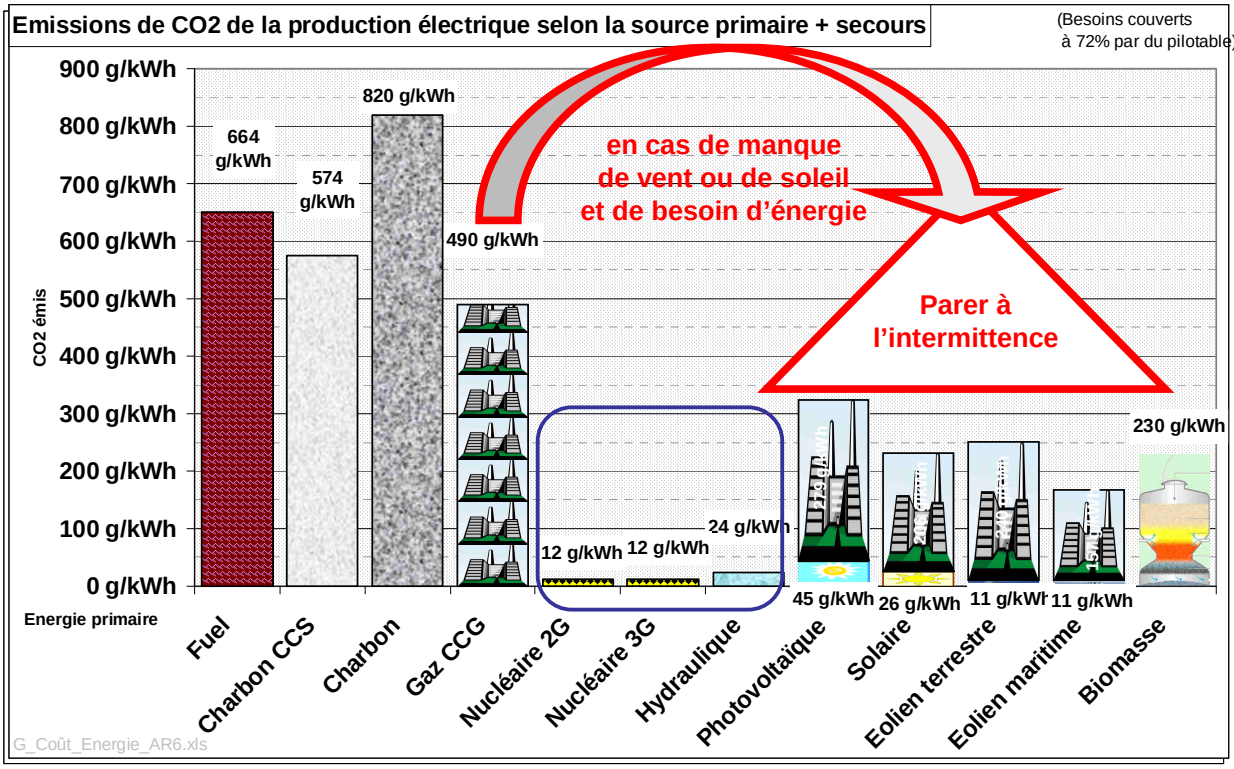


Figure 7-5 : Emissions de CO_2 de la production d'électricité selon la source primaire.

La Figure 7-5 présente une approximation du CO_2 émis pour assurer ce secours. Au total, il apparaît que les énergies hydraulique et nucléaire sont de loin les plus sobres en CO_2.

Il est également possible recourir à la méthanisation de la biomasse et dans les régions désertiques très ensoleillés quasi sans intermittence, à des fours solaires avec stockage de chaleur. Citons par exemple des exemplaires construits à Ouarsasate au Maroc (à sel liquide, de 560MW) et en Calfornie à Ivanpah (380MW).

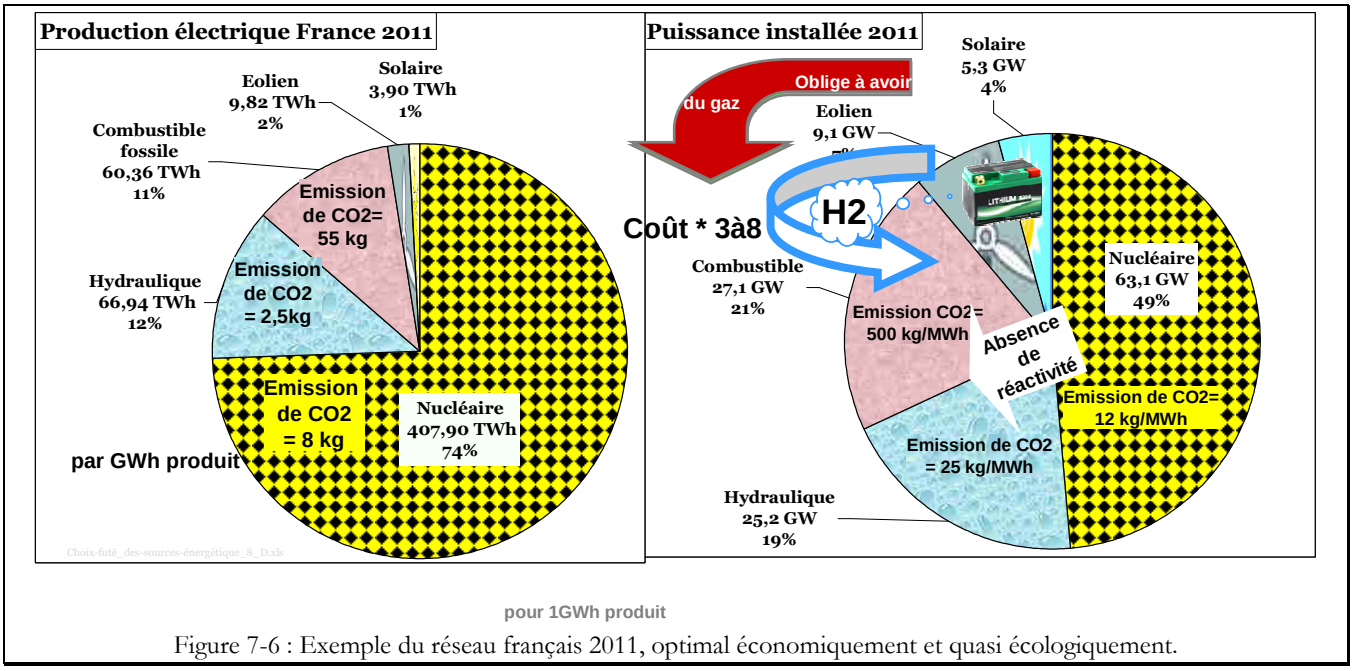


Figure 7-6 : Exemple du réseau français 2011, optimal économiquement et quasi écologiquement.

Le réseau électrique français entre les années 2000 et 2022 était quasi optimal. En 2011, il a été supprimé le surgénérateur Superphénix et installé 13% de capacité renouvelable (Figure 7-6). La présence d'énergie renouvelable exige des sources réactives pour compenser leurs variabilité.

Le recours à des variations de puissance rapides et répétées de la part des centrales nucléaires risque d'entraîner une usure accélérée, voire des détériorations de leur circuit de refroidissement primaire qui fonctionne à jusqu'à 350° et 155 bars de pression (comme le suggère l'apparition de microfissures récemment provoquées par les variations de pression sur un circuit auxiliaire des centrales de 1300 et 1400 GW et qui ont impliqué leur mise en réparation). Subvenir à l'intermittence en mixant essentiellement renouvelables et nucléaire nous parait donc technologiquement imprudent. En 2011, la part d'énergie hydraulique et thermique était à la fois nécessaire et suffisante pour couvrir la variabilité aléatoire des énergies renouveables installées et des variations de consommation. Depuis, la part des énergies intermittente a été accrue, et celle des énergie thermiques réduite sans tenir compte des risques induits de pannes des centrales nucléaires. Paradoxalement, le recours aux renouvelables intermittent devrait accroître les émissions de CO_2 par l'emploi de centrales à ga.

Pour l'éviter, il faudrait :

⇨ soit, stocker l'énergie intermittente en batteries. Alors le surcoût, fonction de la durée de stockage, peut être limité sur une durée journalière, à un facteur 2 (qui diminuera avec la chute progressive du coût des batteries) ;

⇨ soit, sur des durées supérieures produire de l'hydrogène (dit vert) par hydrolyse et l'utiliser dans les centrales à gaz, mais avec un rendement limité à 70% et un coût du gaz multiplié (de 3 à 8 fois).

7. 3 La réduction des émissions de CO2 grâce à l'électricité d'origine nucléaire

On sait que la généralisation de la génération d'électricité par des centrales nucléaires effraie certaines populations et politiques d'états. Les études rationelles démontrent cependant que la technologie actuelle des réacteurs nucléaires, refroidis par eau préssurisée (notamment en France grâce à l'ASN), présente actuellement des risques très inférieurs à n'importe quelle autre technologie (hydraulique, combustibles ou même indirects de construction d'installations de renouvelables). L'énergie nuclaire de fusion, pourra prendre le relais au mieux dans une cinquantaine d'années.

La construction en plus de 10% de réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides permettrait également :

⇨ d'utiliser le minerai d'uranium à près de 100% au lieu de 0,7% et de repousser largement sa date d'épuisement ;

⇨ d'éliminer les déchets transuraniens, comme le plutonium, et le souci de leur stockage sur de longues durées.

La Figure 7-7 représente la réduction possible des émissions énergétiques de CO_2 d'un facteur d'au moins 3, simplement par l'emploi d'électricité nucléaire et extensible à plus de 4, par d'autres propositions réalistes du GIEC.

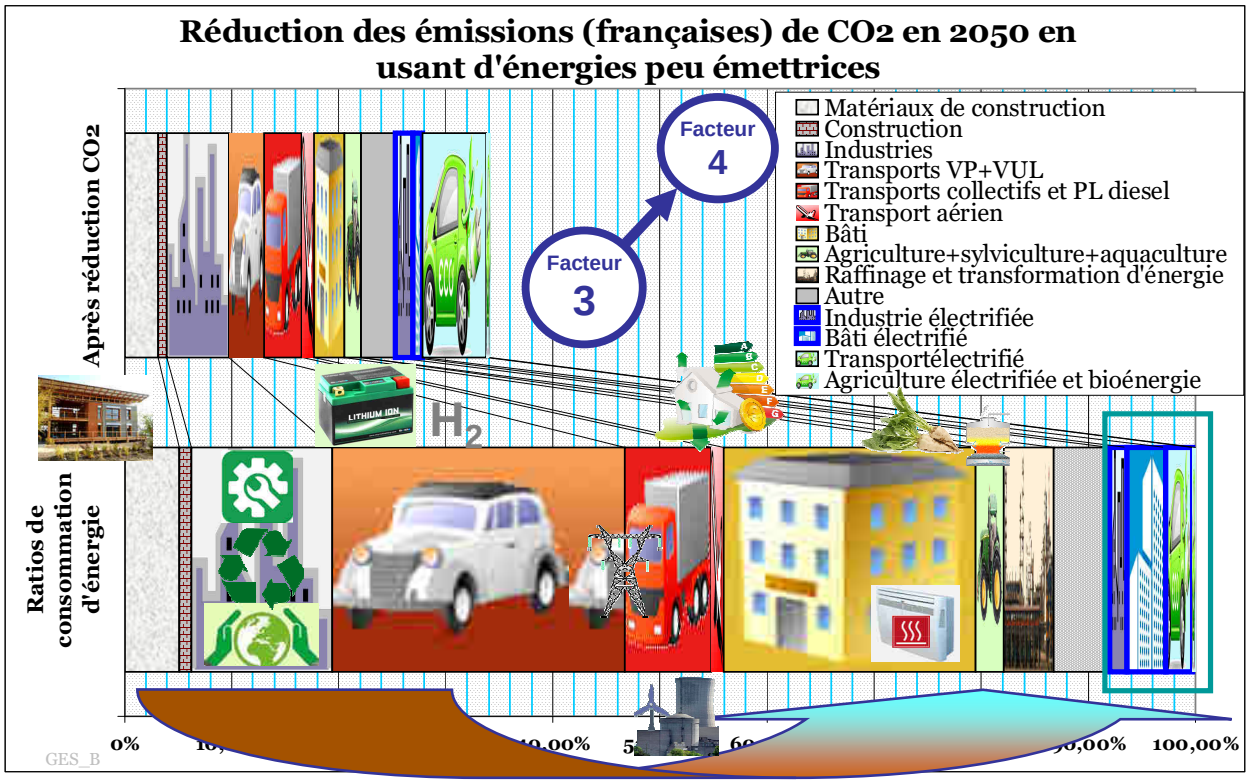


Figure 7-7 : Réduction possible des émissions de CO_2 via l'électricité décarbonée (exemple de la France).

Une soixantaines de centrales nucléaires sont en construction dans le monde. Néanmoins, dans la majorité des pays la solution, la solution est plus critique et coûteuse, car elle exige de construire des sources électriques qui ne fonctionnent pas majoritairement au charbon et au gaz.

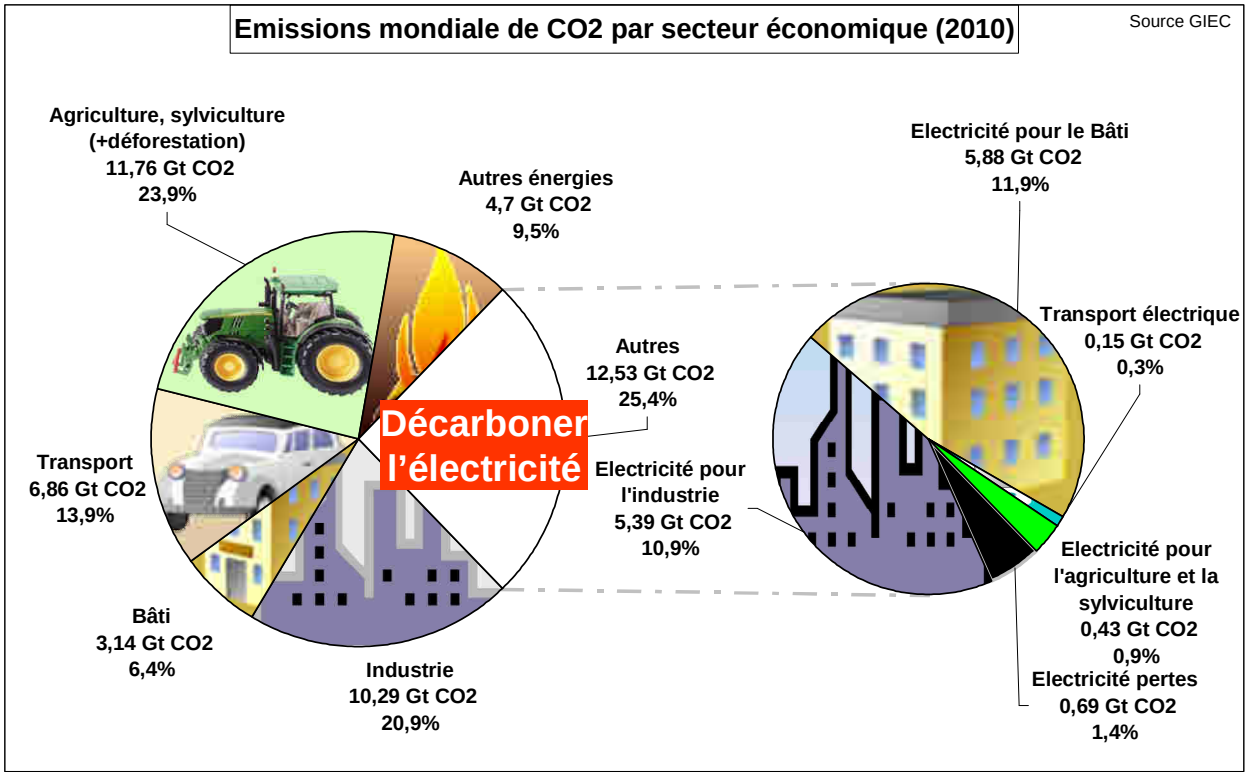


Figure 7-8 : Secteurs d'émission de CO_2 dans le monde.

7. 4 La décarbonation de l'électricité à quel coût ?

Le GIEC propose une grille de coût des sources d'énergie. Malheureusement elle bien moins exhaustive que les analyse d'organisme spécialisés en économie, comme l'OCDE ou la Cour des Comptes. Du coup, les renouvelables sont présentés comme bien moins onéreux et bien plus prométteurs qu'ils ne sont.

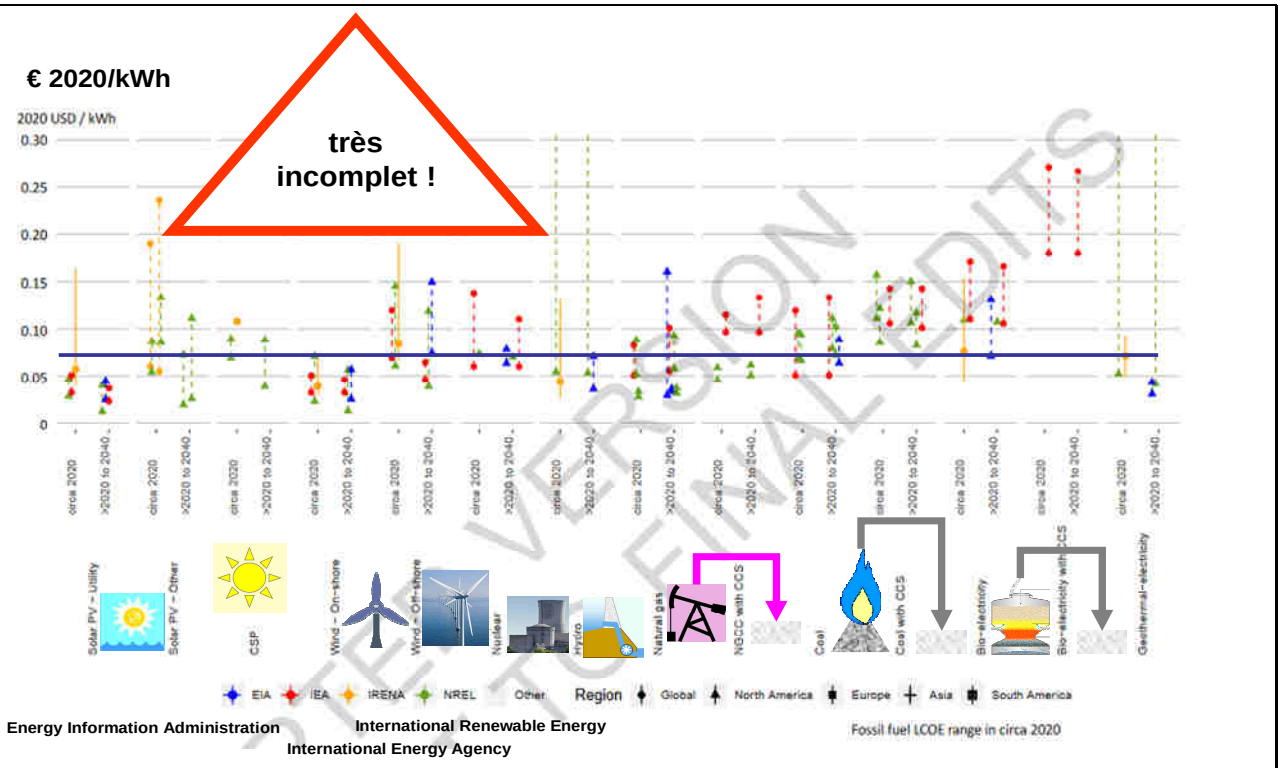


Figure 7-9 : Couts de la production d'énergie électrique selon le GIEC.

Prenons plutôt en considération les coûts complets qui doivent intégrer la continuité de la fourniture, via le réseau et des installations de repli, qui fonctionnent en fait la majorité du temps. Les renouvelables aléatoires sont en fait, surtout des installations à gaz suppléées quand c'est possible par des éoliennes ou du photovoltaïque ce qui réduit temporairement la consommation de gaz.

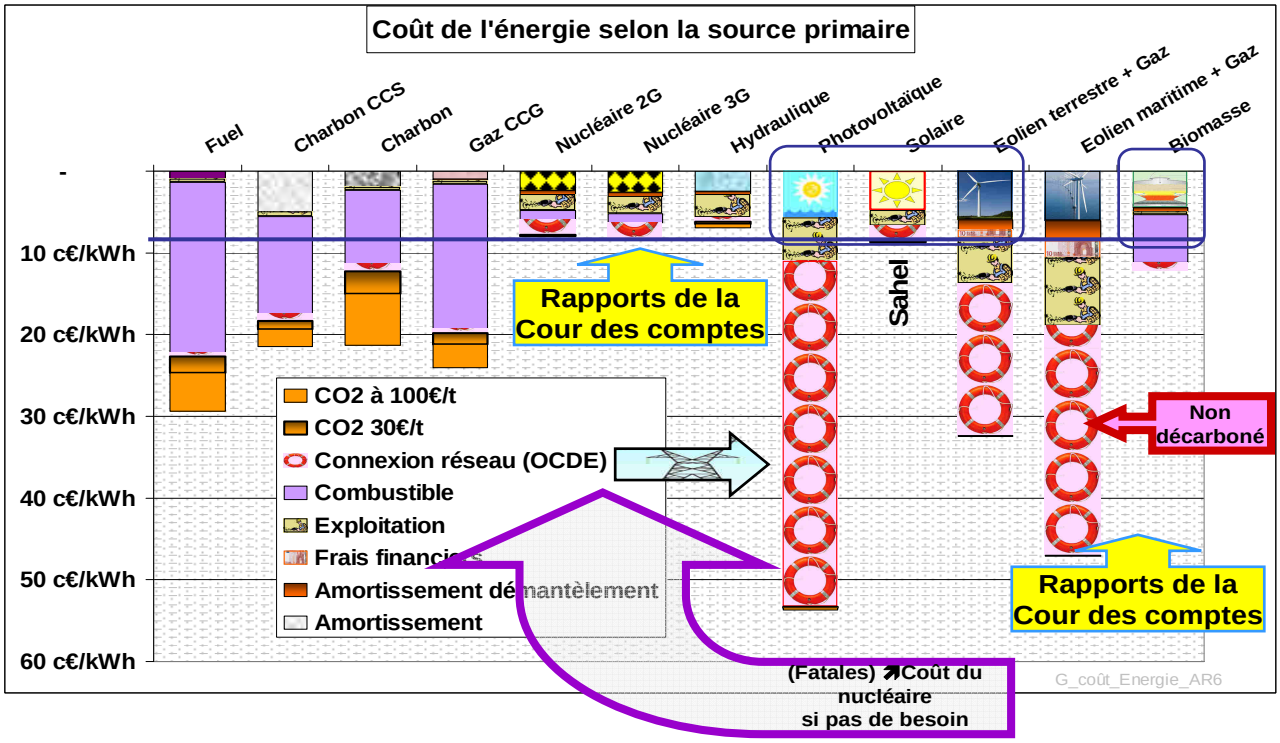


Figure 7-10 : Coûts comparés des diverses sources d'électricité.

En conclusion, les solutions économiquement attractives pour produire de l'électricité décarbonnée sont :

⇨ l'énergie hydraulique, là où cela reste possible (mais à peu d'endroir en France) ;

⇨ l'énergie nucléaire, même en généralisant la production en série des réacteurs de 3ème et 4ème génération ;

⇨ l'énergie solaire calorique, dans les pays à ensoleillement permanent ;

⇨ la méthanisation des déchets (plutôt que la production d'éthanol par culture).

A noter que, contrairement à ce que je suggère, le GIEC considère comme peu probable le recours au nucléaire.

A ne pas utiliser la technologie nucléaire parfaitement au point, il resterait alors à découvrir et mettre au point des solutions non opérationnelles à ce jour (comme du stockage bon marché) qui éviteraient les intermittences de fourniture d'électricité, comme celles qui menancent le réseau français actuel et qui obligent à imposer ce qu'EDF appelle des pudiquement des effacements (contractuels mais coûteux).

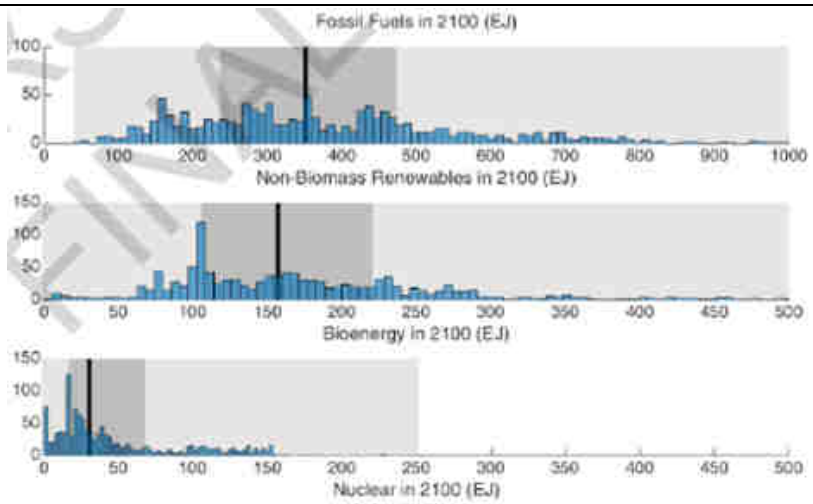


Figure 7-11 : Estimations du GIEC, comme sources d'énergie probables en 2.100.

8 La nécessité d'une action mondiale coordonnée

8. 1 Rappel de la sélection des actions les plus efficaces, parmi celles du GIEC

Pour la France, et d'autres états évolués cette séletion d'évolutions reposerait sur :

⇨ une capacité électrique nucléaire accrue (presque doublée) pour alimenter notamment :
- les véhicules rechargeables (nuit) et les transports en commun (jour),
- le chauffage des bâtiments par des climatisations réversibles,
- la production industrielle.

⇨ la producion d'hydrogène vert pour :
- limiter le CO_2 émis par la métallurgie,
- capter le CO_2 notamment dans les cimenteries (générant du méthane pour le transport).

⇨ la réduction du coût du stockage d'énergie en batteries ;

⇨ le stockage du bois pour construire des immeubles et des objets durables.

8. 2 La part d'énergie consommée par importation

Un tiers du CO2 consommé est issu de nos achats, fabriqués à l'étranger et transportés (moyennant seulement 3% du CO_2 émis).

Figure 8-1 : Un tiers de notre consommation de CO_2 est achetée à l'étranger.

Tant que nos pays fournisseurs n'auront pas fait leur propre mutation écologique, il nous faudrait donc **miser davantage sur le développement industriel et l'automatisation afin d'accroître le pouvoir d'achat moyen, baisser le coût des fabrications et favoriser ainsi l'achat local.**

Pour la France, compte tenu de la de la concurrence mondiale, cette évolution me parait la plus compliquée et incertaine.

---

1. *i O3 = ozone.*
2. *ii CO2 = dioxyde de carbone, dit gaz carbonique*
3. *iii CH4 = méthane.*
4. *iv N2O = Protoxyde d'azote, dit gaz illarant, émis par les endrais agricoles.*

[v] Selon mes compétences en électrotechnique et mon expérience concernant l'équilibre des réseaux électriques acquise en tant que consultant auprès de RTE.