



LE CLIMAT

SCIENCES, DIPLOMATIE ET SOLIDARITÉ

Bernard Tardieu
Président de la Commission
énergies et changement climatique
Académie des technologies

Le Climat

Sciences, diplomatie et solidarité

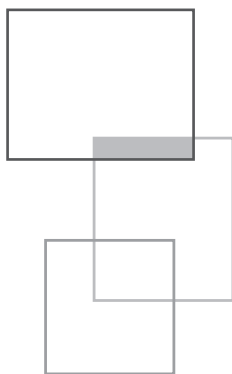
Bernard Tardieu

président de la Commission énergies et changement climatique
Académie des technologies

ISBN : 978-2-7598-2115-0

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© L'auteur, 2017



Remerciements

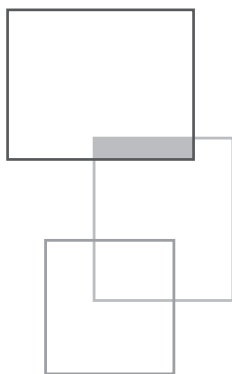
Jean-Claude André a relu et amélioré le texte de ce livre à plusieurs reprises, il a coordonné avec moi l'élaboration du rapport de l'Académie des technologies sur le méthane, auquel les chapitres 4 et 5 empruntent l'essentiel, il est le coauteur avec Olivier Boucher du chapitre 7 sur la géo-ingénierie climatique.

Ghislain de Marsilly a été un lecteur plein de finesse qui m'a permis d'améliorer le texte et de le préciser. Il a participé très fondamentalement à l'élaboration du chapitre 4 sur les ressources hydriques.

François Lefaudeux a rédigé le chapitre « un exemple de conséquences du changement climatique : l'élévation du niveau moyen des mers et océans ». Il a également fait la relecture et la mise en forme finale.

Qu'ils soient tous les quatre très sincèrement remerciés.

Je remercie aussi mes consœurs et confrères de la Commission énergie et changement climatique de l'Académie des technologies, et tous mes consœurs et confrères de l'Académie qui ont participé à l'élaboration d'une vision collective structurée de l'avenir du climat. C'est de cela que rend compte ce petit livre.



L'Auteur



Bernard Tardieu est Président de la Commission « Énergie et changement climatique » de l'Académie des technologies. Il est expert international dans le domaine de l'hydroélectricité, des barrages, des canaux et du génie civil des centrales nucléaires.

Jusqu'à Février 2008, il était président directeur général de Coyne et Bellier-Tractebel Engineering, société de GDF-Suez (maintenant ENGIE). Il en est Président d'honneur. Au sein de cette société, puis à sa tête, il a consacré sa vie professionnelle à développer des grands projets dans le domaine de l'eau et de l'énergie hydroélectrique, dans une

cinquantaine de pays. Il a promu la recherche théorique (modélisation statique et dynamique, poroplasticité, modélisation des géomatériaux) et pratique à l'occasion des expertises, des chantiers et de l'auscultation des barrages.

Il a été vice-président de la Commission internationale des grands barrages, président du Comité français des barrages et réservoirs, vice-président du Comité d'orientation de la recherche en génie civil (1985-1995), membre du Conseil scientifique d'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture). Il est membre du Comité technique permanent des barrages et ouvrages hydrauliques, membre du Conseil scientifique d'EDF, de l'ENPC, et du CHNC, président du conseil scientifique et technique « ouvrages » du Canal Seine Nord Europe- Voies navigables de France.

Il a publié de nombreux articles scientifiques et participé à de nombreux jury de Thèse.

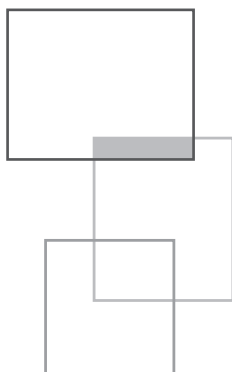


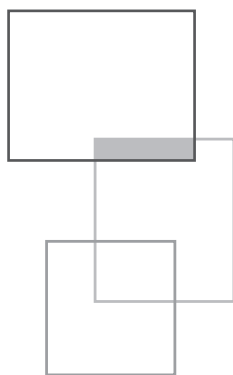
Table des matières

Remerciements	3
L'Auteur	5
Avant-propos	11
Au lecteur	13
Précaution et prévention	17
Chapitre 1 • De Kyoto à Lima, la progression des engagements	19
Le protocole de Kyoto	20
Les mécanismes d'accompagnement	22
Le système européen d'échange de permis d'émission (EU ETS)	24
La COP15 de Copenhague	26
La COP16 de Cancun	28
La COP17 de Durban	29
La COP18 de Doha	32
La COP19 de Varsovie	32
La COP20 de Lima	33
Chapitre 2 • La COP21 de Paris	35
Chapitre 3 • Un exemple de conséquences du changement climatique : l'élévation du niveau moyen des mers et océans	37

Chapitre 4 • Les 20-20-20 ou la voie de l'Union européenne	47
Le cadre énergétique européen	48
Le paquet climat-énergie 20-20-20	51
2030	53
Où en est l'Europe ?	56
Chapitre 5 • Donner un prix au carbone	59
Quelle est l'efficacité du système EU ETS ?	60
Phase 3 : 2013-2020	61
Chapitre 6 • Des ressources hydriques difficiles à anticiper	65
Ce que dit le <i>Giec</i>	67
Des études pour les grands projets de transferts d'eau	69
Des perspectives délicates	73
Chapitre 7 • Le méthane	75
Qu'est-ce que le méthane ?	76
D'où vient-il ?	76
Les zones humides (30 %)	78
Définition et étendue	78
Exemples	79
Classement des zones humides dans le monde	80
La culture du riz (9 %)	81
Animaux d'élevage et animaux sauvages (17 %)	83
Les termites (4 %)	84
Les décharges (9 %)	85
Combustion de la biomasse (8 %)	86
Les sources géologiques (entre 2 et 10 %)	88
Les combustibles fossiles (17 %)	89
Le charbon (6 %)	89
Le gaz naturel (11 %, chiffre commun avec le pétrole et l'industrie chimique)	90
Le pétrole (11 % chiffre commun avec le gaz et l'industrie)	92
Deux sources potentielles de méthane : le pergélisol des zones humides arctiques et les hydrates de méthane marins	92
Chapitre 8 • Méthane : les puits et les solutions d'atténuation	95
Les principaux puits	95
Les sols (6 %)	95
L'atmosphère (94 %)	97

Évolution passée, présente et future du méthane dans l'atmosphère	98
Reconstruction et interprétation des variations paléoclimatiques	98
Variation pendant l'Holocène	98
Variations des concentrations en méthane de l'atmosphère depuis la période industrielle	99
Rétro-actions climatiques sur le cycle du méthane et évolution future	101
Zones humides	101
Pergélisol continental	102
Les hydrates de méthane marins	103
Équivalence « carbone » du méthane : protocole de Kyoto et politiques de changement climatique	104
Évolutions en cours au sein des sources et puits de méthane	104
Évolutions dans les sols en général	104
Évolutions dans les zones humides	106
Le cas particulier des rizières	107
Évolutions au sein des décharges	107
Évolutions en matière de combustion incomplète de la biomasse, le charbon de bois	108
Évolutions en matière d'animaux d'élevage	108
La digestion des ruminants	108
La fermentation des excréments, fumiers et lisiers	109
Évolutions en matière de combustibles fossiles	109
Le charbon	109
Le gaz naturel	109
Le pétrole	110
Les zones arctiques et leurs évolutions à long terme	111
Recommandations de type méthodologique	111
Actions à mettre en œuvre à court terme « sans regret »	112
Conclusions	113
Références pour le méthane	114
Chapitre 9 • La géo-ingénierie du climat	117
Contexte	118
Les méthodes et technologies de gestion du rayonnement solaire (SRM)	119
Les méthodes et technologies d'extraction du carbone de l'atmosphère (CDR)	121
Questions scientifiques et éthiques, quelques recommandations	122
Les techniques de gestion du rayonnement solaire (SRM)	123
La captation du CO ₂ atmosphérique (CDR)	124
Géo-ingénierie en seconde intention	124

De l'importance d'une approche systémique	124
Références	125
Chapitre 10 • La COP21 à Paris (30 novembre - 12 décembre 2015)	127
L'accueil et le travail en commission	127
Le Club de Paris, CDP	128
Exemple de mise au point de texte : les mécanismes de développement propre (MDP)	129
Les conférences et les échanges	130
La séance plénière du 9 décembre	133
L'accord de Paris	134
Le projet de décision	134
Adoption	134
Contributions prévues déterminées au niveau national (acronyme anglais souvent utilisé INDC- <i>Intended Nationally Determined Contribution</i>)	135
Décisions visant à donner effet à l'accord	135
Atténuation	135
Adaptation	135
Pertes et préjudices	135
Financement	136
Mise au point et transfert de technologies	136
Renforcement des capacités	136
Transparence des mesures et de l'appui	136
Bilan mondial / Facilitation de la mise en œuvre et du respect des dispositions / Clauses finales	136
Action renforcée avant 2020	136
Entités non parties	137
Questions administratives et budgétaires	137
Texte de l'accord de Paris	137
Pour conclure	139
Chapitre 11 • 2016 : de la COP 21 à la COP 22	141
2016, l'année des signatures de l'accord de Paris	141
Un accord contraignant pour les États membres de l'UE	143
Le prix du carbone, les avancées en 2016	145
La COP22 à Marrakech	146
Annexe. Les projections du Giec	149



Avant-propos

Longtemps, les femmes et les hommes se sont comportés comme si leurs manières de vivre et d'agir n'avaient aucune influence sur la planète qu'ils habitent. La terre a subi des bouleversements considérables au cours de sa longue histoire, ne seraient-ce que ces quatre époques glaciaires depuis que l'Homme est apparu, et dont la dernière s'est achevée il y a seulement 16 000 ans. Le niveau de la mer était alors 30 mètres plus bas, après avoir été environ 120 mètres plus bas il y a 20 000 ans. L'idée que la nature toute-puissante compenserait leurs actions était partagée par tous les humains. Pourtant, malgré des alertes précoces à la fin du XIX^e siècle par Arrhenius (en 1896) et Thomas Chamberlain, et au milieu du XX^e siècle (Gilbert Plass en 1955, puis Charles Keeling, etc.), ce n'est qu'à la fin du XX^e siècle que cette idée de l'influence des comportements humains, individuels et collectifs, sur le climat de la planète est apparue comme de plus en plus vraisemblable. L'augmentation rapide de la teneur atmosphérique en gaz carbonique depuis le début de l'ère industrielle a alerté les scientifiques. Ce faisant, l'effet de serre principalement dû à la vapeur d'eau de l'atmosphère, se trouve augmenté, conduisant à une augmentation progressive des températures et à des changements climatiques variables selon les zones de la planète. Cette nouvelle perception de la relation à la planète est devenue un souci croissant pour certains, mais pas encore pour tous. Pourtant, si le climat de la terre a beaucoup changé dans le passé, l'humanité est devenue plus dense, plus vulnérable, moins résiliente à de nouveaux changements de climat ou de niveau de la mer. Or, dans ce débat et dans cette recherche de vision commune sur le climat, c'est bien de l'avenir des sociétés humaines qu'il s'agit.

Jusqu'alors, les politiques et les stratégies énergétiques des pays consistaient à sécuriser leur approvisionnement énergétique, soit en utilisant les ressources de leur sol et de leur sous-sol, ou celles de leurs possessions et zones d'influences issues du passé colonial, soit en se dotant des moyens, notamment militaires, pour sécuriser

cet approvisionnement. Depuis le début de l'ère industrielle, ces ressources étaient presque exclusivement fossiles (hydrocarbures et pour une moindre part, uranium), seule l'hydraulique tenait une place à part, et la biomasse continuant d'être la principale source de chaleur en particulier dans le monde rural.

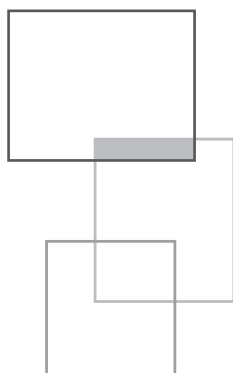
En 1992, profitant du sommet de la terre à Rio de Janeiro, l'ONU a adopté un cadre d'action pour traiter les questions climatiques : la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Quasiment tous les pays du monde, les « parties », se réunissent une fois par an depuis 1995 sur le sujet du climat, lors des *Conférences Of the Parties*, les COP.

Ces réunions sont éminemment politiques. Chaque pays défend sa position, cherchant à se grouper avec d'autres pays partageant plus ou moins les mêmes vues. Comme c'est au cours de ces COP que les accords sont élaborés et signés, des sessions de négociations sont organisées en amont des COP, réunissant les représentants des parties, mais aussi des collectivités territoriales, des ONG et des scientifiques.

Les accords portent sur les engagements de réduction des émissions anthropique des gaz à effet de serre, l'évolution de ces engagements et l'application de la convention-cadre.

Les désaccords sont de différents types. Le plus important concerne l'attribution de la responsabilité du changement climatique. Les pays déjà industrialisés au XIX^e siècle, fortement consommateurs de charbon dès cette époque, et donc fortement émetteurs de gaz à effet de serre, sont considérés par les pays dont le développement industriel est plus récent comme responsables des changements climatiques amorcés actuellement. Selon ces pays, les anciens pays industrialisés doivent donc porter la plus grande part de l'effort de réduction des émissions de GES, puisque la rémanence du CO₂ dans l'atmosphère dépasse le siècle (ce n'est pas le cas du méthane, un autre gaz à effet de serre très puissant, qui a un temps de résidence significativement plus court, de l'ordre de 25 ans). La Chine a maintenant dépassé les USA en quantité de GES émis annuellement, mais cela n'exonère pas l'accumulation des XIX^e et XX^e siècles due aux pays industrialisés durant ces périodes. Tous les pays qui se sentent directement menacés par une modification climatique qui entraînerait, par exemple, une modification du niveau des mers, se mobilisent pour attirer l'attention sur leur cas. Les USA se montrent très réticents à s'engager à modifier le style de vie des citoyens américains¹, très forts consommateurs d'énergie par individu, tandis que la communauté européenne s'est engagée de façon volontariste dans des stratégies de transition énergétique. La première COP s'est tenue à Berlin en 1995. À l'occasion de la 3^e COP, en 1997, le protocole de Kyoto a été signé : 37 pays développés se sont engagés à réduire leurs émissions de 5 % en moyenne sur la période 2008-2012 par rapport aux niveaux de 1990. C'est là le premier engagement collectif marquant d'une histoire qui détermine l'avenir de notre planète. Nous reviendrons sur les deux groupes de signataires.

1. Ce document a été écrit avant l'élection du président Trump.



Au lecteur

Les habitants de notre terre entraînent vaille que vaille dans le troisième millénaire. Les pays dominants n'étaient pas les mêmes au XX^e siècle qu'au XIX^e siècle, mais les choses ne changeaient pas beaucoup pour la plupart des habitants. L'enjeu de la géostratégie était toujours de sécuriser par tous les moyens possibles l'approvisionnement en matières premières stratégiques, et en premier lieu les énergies fossiles, et chaque pays tentait de faire valoir ses droits. Et voilà que le souci du climat pénètre les esprits. Nous découvrons qu'il faut impérativement réduire notre consommation de combustibles fossiles et développer des énergies non émettrices de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone produit par la combustion de ces combustibles fossiles.

Ce livre traite de stratégie et de diplomatie. Comment rendre compte du changement fondamental introduit par le climat dans la géopolitique mondiale ? La géopolitique est depuis longtemps structurée par les rapports de force dans le contrôle de l'approvisionnement en ressources énergétiques fossiles. L'énergie fossile est devenue l'épine dorsale du système mondial. Le souci du climat discrédite progressivement les ressources fossiles et modifie les rapports de force associées à la possession et au contrôle de ces ressources. Peut-être n'épuiserons-nous pas les ressources fossiles de notre planète, ou bien dans très longtemps. Comment cette évolution s'est-elle produite dans les esprits des habitants de la terre et quelles en sont ses conséquences ?

Pour traiter ce sujet, nous avons choisi quelques thèmes qui nous paraissent majeurs. Ce ne sont pas les seuls. Certains sont peut-être plus importants, mais nous n'avons pas la compétence pour les traiter.

Le premier chapitre expose la progression des engagements pris par les pays (les parties) qui font partie de la *Conférence of the Parties*, la COP et la manière dont

cette progression est accompagnée ou précédée par des changements structuraux du prix des matières premières énergétiques fossiles (charbon, pétrole, gaz principalement).

Le deuxième chapitre présente l'expérience énergétique de l'Union européenne, la nôtre donc, depuis que l'Union existe. L'énergie a toujours été structurante pour l'Union et les contrastes qui existent entre les États membres pour la production d'électricité (charbon et nucléaire en particulier) témoignent du poids de l'histoire.

Le troisième chapitre illustre les conséquences du changement climatique en cours sur une grandeur extrêmement sensible pour de nombreuses zones de peuplement, le niveau de la mer.

Le quatrième chapitre analyse la question du prix à donner au carbone fossile pour pénaliser les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ce prix a aussi pour objectif de provoquer le consentement à payer pour assumer les conséquences des émissions dont on est directement ou indirectement responsable et, en même temps, de financer le développement d'industries et de technologies moins émettrices de GES.

Le cinquième chapitre traite de l'évolution des ressources en eau associées au changement climatique. Dans beaucoup de pays, l'eau est une préoccupation majeure. La stratégie de mobilisation et de gestion de l'eau doit-elle évoluer et comment ? Les infrastructures de l'eau doivent-elles être modifiées ? Comment traverser les périodes de sécheresse ? Ces questions sont à la fois technologiques et hautement politiques.

Les sixième et septième chapitres concernent le méthane. Si la transformation du carbone fossile contenu dans le charbon, le pétrole et le gaz naturel en dioxyde de carbone est facile à comprendre et à évaluer, le rôle du méthane est beaucoup plus difficile à comprendre. Or il est généré de multiples façons par la nature et par l'action des hommes. Le méthane est un gaz à effet de serre très puissant, mais sa durée de vie est courte, contrairement au dioxyde de carbone dont la durée de vie est longue, avec des effets cumulatifs. Il faut essayer de comprendre le méthane, c'est-à-dire les sources et les puits de méthane et s'en méfier.

Le huitième chapitre présente les techniques de géo-ingénierie climatique. La géo-ingénierie analyse la plupart des méthodes d'atténuation de l'effet de serre par des actions « interventionnistes » dans l'atmosphère, dans l'océan ou à la surface de la terre. Cette approche intéressante à explorer *a priori*, ne laisse pas beaucoup d'espoir à ceux qui préféreraient ne rien faire pour limiter les émissions de GES dans l'attente qu'une solution artificielle résolve les problèmes le moment venu.

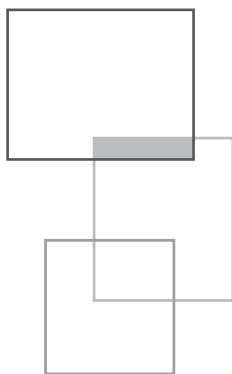
La postface décrit le déroulement de la COP 21 au Bourget, comme une expérience vécue. Il analyse les principes d'élaboration des textes, la manière dont les oppositions et les postures ont progressivement été résorbées jusqu'à la présentation finale du samedi 12 décembre, avec seulement une demi-journée de retard, et beaucoup de nuits de négociations. Il analyse l'accord de Paris et du document qui l'introduit.

Le dernier chapitre résume l'année 2016 qui fut l'année de la réception à l'ONU (New York) des signatures de l'accord de Paris, du dépôt des contributions nationales

(INDC) et l'année de la tenue de la COP 22 à Marrakech. Il montre l'organisation particulière de l'Europe au sein du schéma planétaire et la répartition de l'effort de réduction des émissions entre les États membres de La Communauté européenne.

L'annexe présente le Giec, groupe d'experts international sur l'évolution du climat, créé en 1988. Cette démarche d'expertise collective planétaire est une première mondiale. Le projet de constituer une sorte de « gros cerveau collectif » pour traiter de tous les aspects du climat était très ambitieux. Malgré les critiques, parfois justifiées, le résultat est un grand succès scientifique et diplomatique.

B.T.



Précaution et prévention

Le principe de précaution a été introduit dans la Constitution française, la définition de ce principe est claire, mais l'expérience montre qu'il a été souvent invoqué en méconnaissance de cette définition. D'où ce court chapitre d'éclaircissements sémantiques.

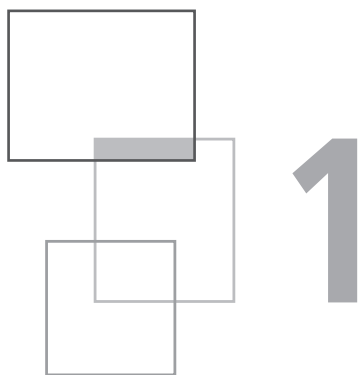
La notion de prévention est connue depuis longtemps dans les sociétés développées (comme les sociétés occidentales, mais aussi beaucoup d'autres) : si on sait par expérience qu'une action ou une politique a certainement des conséquences négatives, la société concernée prend des mesures pour réduire le plus possible ce type d'action ou pour trouver une politique alternative ayant des conséquences moins néfastes. Ainsi, les accidents de voiture sont un fait d'expérience. Supprimer les voitures sauverait des vies, mais aurait ailleurs des conséquences dramatiques pour l'organisation et la vie quotidienne de la société et de ses membres : un éventail de mesures de prévention est donc défini et mis en œuvre : normes de sécurité active et passive des véhicules ; amélioration du réseau routier, limitation de vitesse, meilleure formation et responsabilisation des conducteurs...

Il en va de même aujourd'hui pour le tabagisme : toutes les études scientifiques montrent une corrélation causale importante entre le tabagisme et le risque d'un nombre conséquent de maladies. La prévention consiste en l'éducation des membres de la société sur les risques graves du tabagisme et, d'autre part, en une politique de prix aussi dissuasive que possible.

L'exemple du tabac est intéressant car jusqu'à une époque assez récente, l'existence d'une telle corrélation causale forte ne faisait pas unanimité : cette situation permet de faire la transition entre prévention et précaution. On met en œuvre le principe de précaution quand il existe une présomption de relation significative entre un comportement ou des faits expérimentaux et des conséquences potentielles graves sur la

société. Ce principe a été introduit dans notre Constitution en ayant explicitement en vue la question climatique : il y a dix ans, les scientifiques, mettaient en avant ce qui est le fondement même de la méthode scientifique : le doute sur les résultats, sur les méthodes et, encore plus difficile à éliminer, le doute sur soi-même et les biais que les *a priori* ne manquent pas d'introduire tant dans les choix expérimentaux que dans l'interprétation des faits.

Pour ce qui concerne le changement climatique, est-on aujourd'hui encore dans le cadre du principe de précaution ou est-on passé dans le domaine de la prévention ? Le point de vue des auteurs de ce livre est que nous sommes rapidement passés de la précaution à la prévention, tant, de rapport en rapport, le *Giec* consolide ses modèles et ses prévisions et, même si tout n'est pas compris, réduit à une peau de chagrin la place des incertitudes et du doute, tant sur les causes que sur l'ampleur des changements.



De Kyoto à Lima, la progression des engagements

Le fonctionnement d'une COP est double. D'une part, des principes sont élaborés et des débats sont organisés sur des sujets techniques. D'autre part, les pays se réunissent de manière à élaborer des stratégies par groupe d'intérêt commun.

Les principes sont les suivants :

- le principe de précaution (et on devrait sans doute dire aujourd'hui de prévention de préférence à précaution, tant les incertitudes se réduisent) ;
- le principe des responsabilités communes, mais différenciées ;
- le principe du droit au développement.

Le principe de précaution, que la France a inscrit dans sa Constitution sous une forme générale, pose que les actions humaines qui modifient de manière irréversible l'environnement ne sont pas acceptables, même si l'effet n'est pas établi avec certitude. Notons que le concept d'irréversibilité dans un système naturel qui évolue en permanence sans retour en arrière n'est pas d'un maniement facile. Qu'est ce qui est réversible ? En tout cas, pas le temps !

Le deuxième principe concerne les pays industrialisés qui ont beaucoup pesé sur les émissions de GES depuis le XIX^e siècle et qui ont des moyens techniques et financiers pour proposer des solutions.

Le troisième principe établit que la lutte contre les changements climatiques ne doit pas freiner le progrès économique et humain des pays en développement.

Le protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto est le premier acte réellement planétaire qui transforme en décision la prise de conscience exprimée en 1992 au sommet de la terre à Rio de Janeiro. C'est à Kyoto que s'est exprimé l'engagement verbal des États les plus riches de notre planète à stabiliser les émissions de GES pour qu'elles ne dépassent pas, en 2012, leur niveau de 1990. Les engagements du protocole de Kyoto sont, en principe, juridiquement contraignants pour les parties.

Ce protocole détaille les réductions d'émission concernant les différents gaz à effet de serre.

Il explicite les raisons principales supposées à l'époque (et largement confirmées depuis) de réduction de ces émissions : le gaz carbonique (combustion des énergies fossiles et déforestation), le méthane (élevage des ruminants, culture du riz, décharges d'ordures ménagères, exploitations pétrolières et gazières), les halocarbures (HFC et PFC, des gaz réfrigérants utilisés dans les systèmes de climatisation, la production de froid et la propulsion des aérosols), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O , qui provient de l'utilisation des engrais azotés et de certains procédés chimiques), l'hexafluorure de soufre (SF_6 , utilisé, par exemple, dans les transformateurs électriques ou les postes électriques blindés). Nous reviendrons sur ces prémisses qui s'assimilaient plus à une négociation politique qu'à une approche scientifique détaillée et globale.

Les pays qui auraient dû signer le protocole de Kyoto sont les pays dits « de l'annexe 1 », c'est-à-dire les pays développés ou en transition vers une économie de marché (dont la Russie et la Turquie), ces pays ayant accepté de réduire de 5,5 % leurs émissions sur la période 2008-2012 comparées aux émissions de 1990. L'Union européenne a accepté une réduction de 8 %, les États-Unis de 7 %, le Japon de 6 %. L'Australie, grand exportateur de charbon a refusé de signer l'accord de Kyoto en 2002, puis l'a signé en 2007. Les pays hors annexe 1, non engagés à signer l'accord, sont notamment la Chine, l'Inde, l'Afrique du Sud (grands pays charbonniers), l'Arabie saoudite, l'Algérie, l'Angola, le Nigeria, le Venezuela, le Brésil et la Corée. Les pays observateurs étaient notamment le Saint-Siège, l'Irak et la Somalie.

Notons que ces engagements correspondent, dans bien des cas, à des émissions peu ou mal mesurées. La seule émission relativement facile à contrôler est l'émission de CO_2 correspondant à l'usage des combustibles fossiles : les différents types de charbon et lignite, les hydrocarbures liquides et les gaz fossiles, essentiellement le méthane. Un simple calcul de transformation des atomes de carbone du combustible en gaz carbonique par oxydation donne le tonnage de CO_2 émis à partir de la quantité de combustibles brûlés. Nous reviendrons sur ce point.

Ce protocole propose un engagement de réduction en pourcentage par rapport à une année de référence, en l'occurrence 1990 ; cet engagement ne tient pas compte des émissions du pays concerné, soit par habitant, soit par point de PIB. Par exemple, un pays comme la France a opté depuis un demi-siècle pour la sortie du

charbon, avec une économie fortement électrifiée, grâce à l'hydroélectricité puis à l'électricité nucléaire, et un parc automobile dont la consommation est plutôt faible. En conséquence, la France émet peu de GES par habitant ou par point de PIB. Une réduction en pourcentage à partir d'une base très différente la conduit alors à faire un effort plus important que le voisin allemand, qui produit l'essentiel de son électricité et une part de son chauffage avec du charbon et du lignite et qui, en outre, consomme beaucoup de gaz. Les États-Unis consomment beaucoup plus d'énergie par habitant que les pays européens et, bien sûr, que les autres pays moins développés. Le simple fait d'aligner le standard américain sur le standard européen diminuerait les émissions de beaucoup plus de 7 %, valeur de réduction à laquelle les États-Unis s'étaient engagés. La carte suivante (figure 1.1) présente les émissions par habitant évaluées par pays.

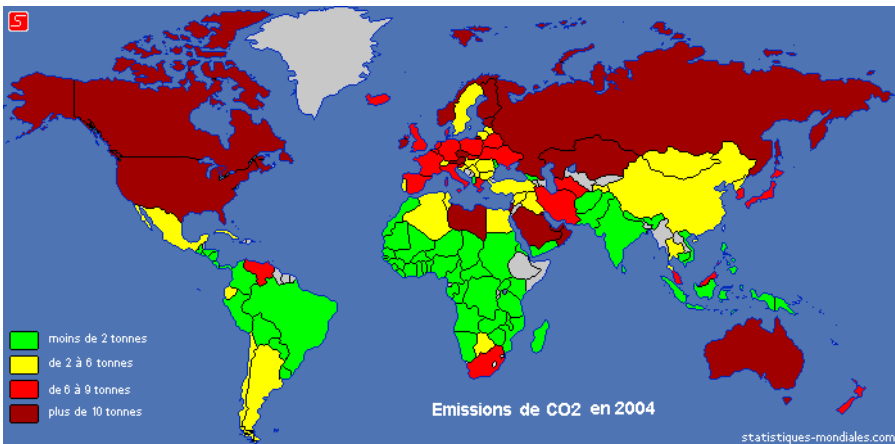


Figure 1.1 Émissions de CO₂ par habitant selon les pays en 2004

Mais la date de départ retenue et les événements économiques ultérieurs comptent aussi beaucoup. La réunification de l'Allemagne a conduit ce pays à fermer de nombreuses usines fortement émettrices de CO₂ et peu rentables dans la partie orientale du pays, ce qui a fortement diminué les émissions de GES du pays unifié. La fermeture de sites industriels obsolètes en Russie a aussi conduit à des réductions d'émission. Ces réductions d'émissions sont fortuites et ne proviennent pas d'un effort nouveau de réduction des émissions, ni surtout d'une décision de transition énergétique.

Le 16 février 2005, lorsque plus de 55 pays eurent déposé leurs instruments de ratification, le protocole de Kyoto est entré en vigueur.

Les États-Unis, qui émettent 30 à 35 % des quantités mondiales de GES, ont décidé dès 2001 de ne pas ratifier le protocole, ce qui n'empêche pas sa mise en œuvre pour les pays qui l'ont ratifié. 22 pays industriels (plus la Communauté européenne à 25) ont signé, 13 pays en transition et 121 pays en développement. Trois pays

développés ont signé, mais non ratifié le protocole, l'Australie, les États-Unis et Monaco. Un pays en transition, la Croatie, un pays en développement, la Zambie. D'autres pays n'ont ni ratifié ni signé, Andorre, Bahreïn, Saint-Christophe-et-Névis, Saint-Martin, Singapour, Taïwan, Vatican, Liban, Turquie, Afghanistan, Angola, Bosnie-Herzégovine, Cap-Vert, République Centrafricaine, Comores, Côte-d'Ivoire, Gabon, Irak, Libye, Sao Tomé-et-Principe, Sierra Leone, Somalie, Swaziland, Syrie, Tadjikistan, Tchad, Tonga, Zimbabwe.

Les mécanismes d'accompagnement

Plusieurs mécanismes ont été proposés pour faciliter l'atteinte des objectifs du protocole.

Le premier est la création de permis d'émission de gaz à effet de serre qui peuvent s'échanger entre ceux qui en ont besoin pour atteindre leurs objectifs et ceux qui en ont trop. C'est une approche libérale qui donne au marché le rôle de fixer un prix au carbone émis en permettant des échanges de ces permis d'émission. Ce mécanisme de marché a pour ambition de favoriser en premier lieu les projets de diminution d'émissions de GES là où elles sont le moins coûteuses ou le moins perturbatrices pour l'économie. Un système d'échange a été mis en place (*Exchange Trading System*). L'Europe a développé son propre système (EU ETS) sur lequel nous reviendrons.

La « mise en œuvre conjointe » (MOC) permet de procéder à des investissements entre pays de l'annexe 1, dans l'esprit des échanges de crédit carbone et au prix fixé par le marché. Le « mécanisme de développement propre » (MDP), ou *Clean Development Mechanism* (CDM), permet de générer des crédits carbone dans les pays hors annexe 1 grâce à des investissements des pays de l'annexe 1.

Ce deuxième mécanisme a pour objectif de créer une solidarité entre tous les pays. Au-delà, le discours très fort de solidarité intergénérationnelle dans les questions de climat masque un discours assez peu audible sur les conditions de vie présentes des très nombreuses populations qui n'ont pas accès à l'électricité, à une énergie autre que la biomasse traditionnelle, ni à l'eau potable. Développer, via des investisseurs venus des pays riches, des projets durables et non émetteurs de GES dans des pays ou des régions peu développés crée une dynamique de progrès et de solidarité que le MDP veut encourager. Certains pensent toutefois que ceci introduit une sorte de « droit à polluer », à connotation « immorale ».

Le mélange de principes de solidarité et de principes libéraux fixant le prix par le marché porte en soi certains risques.

C'est en décembre 2001, à la COP organisée à Marrakech (COP7), qu'ont été fixés les critères d'éligibilité des projets relevant du MDP :

- le pays hôte doit avoir ratifié le protocole de Kyoto et donner son accord formel au projet ;

- le projet doit être enregistré au secrétariat de la Convention climat (tiers certificateurs accrédités UN) et pour cela :
 - démontrer la quantité de CO₂ évitée,
 - démontrer l'additionnalité (effet déclenchant), c'est-à-dire que les émissions avec le projet sont globalement plus faibles que sans le projet,
 - les certificats émission réduction (CER) sont attribués après exécution et audit des tiers certificateurs.

Un CER est délivré pour 1 tonne de CO₂ équivalent évité. Les gaz autres que le CO₂ sont assimilés au CO₂ par un coefficient d'équivalence (voir plus loin). Les CER sont émis sous l'autorité du comité exécutif du MDP. Les acheteurs sont, notamment en Europe, les entreprises industrielles ou les pays soumis à une contrainte carbone, notamment à un plafond annuel d'émission (*cap*), qui peuvent compenser par des achats de CER les quantités de CO₂ émis dépassant le plafond imposé.

Les principaux financeurs du système CDM sont les pays européens. Le système d'échange des quotas sur la plate-forme européenne permet d'utiliser et de valoriser les CER au prix d'un quota d'*European Union Allowance* (EUA, c'est-à-dire les quotas d'émission ou les quantités d'émission maximales reçues ou achetées aux enchères par les industriels émetteurs de gaz à effet de serre). De ce fait, le marché du carbone est actuellement tiré et financé par l'Europe via son système d'échange.

La procédure complète se déroule ainsi. Le projet est présenté dans un document d'une cinquantaine de pages nommé *Project Design Document* ; ce document est soumis à un tiers validateur (société de contrôle agréée) puis à l'UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) qui, si besoin, pose des questions complémentaires. Si les réponses sont satisfaisantes, le projet est enregistré ; à défaut, il est rejeté. Tous les ans, le validateur vérifie le respect des objectifs et émet les CER. Ceux-ci sont vendus par le porteur du projet sur le marché *spot* européen à des industriels qui le souhaitent ou à des pays de l'annexe 1.

Les projets développés sous la bannière de Kyoto permettent d'éviter annuellement l'émission de 400 millions de tonnes de CO₂, soit l'équivalent des émissions de la France ou 2,6 % des émissions mondiales (hors agriculture, ce secteur comportant aussi des puits de GES).

L'analyse détaillée de l'ensemble de ces mécanismes montre que la complexité et la lourdeur des processus d'attribution des crédits carbone favorisent les industriels capables de monter de gros dossiers avec l'aide de consultants et de lobbyistes (comme c'est le cas dans les secteurs de la chimie, du pétrole et du gaz, de l'acier ou du ciment). En particulier, l'additionnalité du projet, c'est-à-dire le fait qu'il déclenche des économies d'émission, demande une grande expérience des critères d'évaluation appliqués. Notons ici que les subventions aux énergies renouvelables intermittentes ne sont pas soumises à la démonstration de l'additionnalité, bien qu'il arrive qu'elles ne diminuent pas les émissions de GES. La majorité de la rente carbone revient ainsi à ces industriels importants.

En revanche, les projets diffus, énergétiques ou agricoles (méthane) accèdent très difficilement, et à un coût trop élevé pour être rentables, à l'attribution de crédits

carbone. En effet, la mise en place des procédures est longue et coûteuse, notamment la démonstration de l'additionnalité. Lorsqu'un projet est proposé dans un pays qui n'en n'a jamais été bénéficiaire, cette démonstration exige un effort de synthèse qui généralement dépasse les capacités des monteurs d'affaire. La démarche globale impose le recours à des cabinets spécialisés qui préfèrent s'occuper des gros projets.

La Chine a bénéficié de 35 % des projets, l'Inde de 25 % et l'Afrique de pratiquement rien.

La période de test de 2005 à 2007 a été suivie de la période d'application de 2008 à 2012. Cette mise en route progressive a permis d'ajuster les plafonds des quotas imposés aux industriels européens de façon à parvenir à un prix opérationnel, considéré à l'époque comme plutôt faible (15 € / tonne CO₂).

Le système européen d'échange de permis d'émission (EU ETS)

Au niveau communautaire, l'Union européenne a mis en place les instruments juridiques nécessaires pour traduire sa volonté d'appliquer les dispositions du protocole de Kyoto.

Le marché européen des permis d'émission est une réalité depuis le 1^{er} janvier 2005. Le système d'échanges a été instauré à cette date grâce à la directive 2003/87 dite « quotas », afin d'expérimenter le dispositif de marché et d'anticiper sur la période d'engagement prévue par le protocole de Kyoto (2008-2012). Il vise dans un premier temps les émissions de CO₂ des secteurs les plus gros émetteurs (papier, verre, ciment, secteur énergétique et raffineries), soit 45 à 50 % du total des émissions de CO₂ de l'industrie. Environ 12 000 installations de l'Union européenne (à 25 membres) sont concernées.

Le principe est le suivant. Les États-membres fixent, pour chaque période, des objectifs de réduction d'émission à chacune des installations concernées à travers un plan national d'affectation des quotas (dit PNAQ) préalablement validé par la Commission. Au début de chaque période, les États membres affectent un volume donné de quotas aux exploitants des installations, sur la base des émissions des activités concernées. Un quota correspond à l'émission de l'équivalent d'une tonne de CO₂. Deux périodes de mise en œuvre étaient prévues : 2005-2007 et 2008-2012.

Les exploitants doivent restituer à la fin de chaque période le nombre de quotas correspondant à leurs émissions de CO₂. L'intérêt économique du système de quotas est qu'ils sont transférables et négociables : ils peuvent être échangés par les exploitants des installations. Cet outil de marché doit favoriser une répartition efficace des efforts entre les acteurs concernés par la directive. Les exploitants pour lesquels les coûts de réduction de leurs émissions seront trop élevés pourront atteindre leur objectif (c'est-à-dire restituer le nombre de quotas correspondant à leurs émissions sur la période) en achetant des quotas supplémentaires à des exploitants pour qui les

coûts sont moindres et qui auraient un excédent à revendre (c'est-à-dire un nombre de quotas correspondant à un volume de CO₂ supérieur à leurs émissions sur la période).

Au niveau national, le mécanisme de marché de quotas d'émission, instauré à l'échelle communautaire, ne peut toutefois suffire à lui seul au respect des engagements internationaux. S'il vise le principal gaz à effet de serre, en volume d'émissions, qu'est le dioxyde de carbone, il ne concerne qu'une partie du secteur industriel et énergétique, exclut les secteurs de l'agriculture, des transports, du résidentiel et du tertiaire. Or, ces deux derniers secteurs sont, en France, les principaux émetteurs de gaz à effet de serre et, contrairement au secteur industriel et énergétique, leurs émissions continuent de croître. La figure 1.2 suivante présente les contributions des différents secteurs aux émissions mondiales.

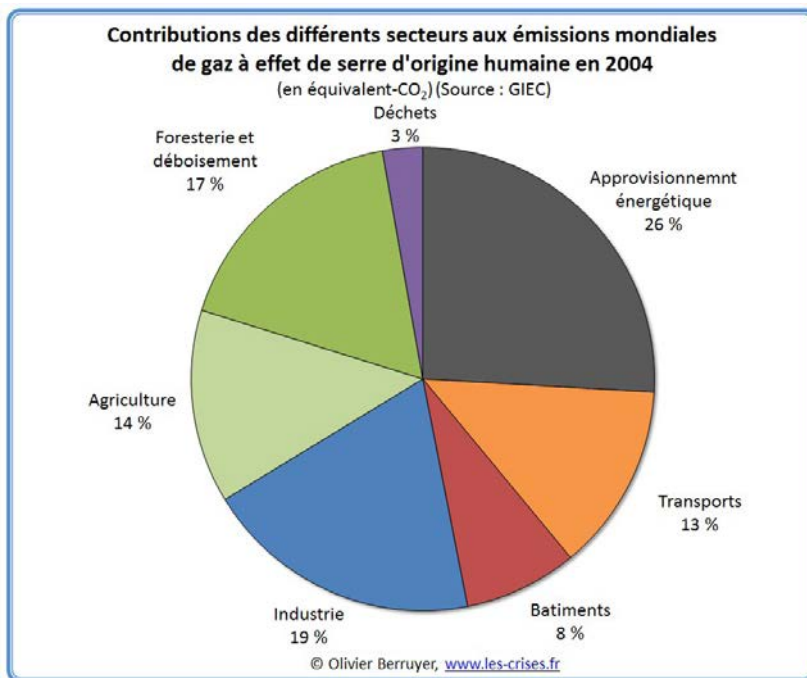


Figure 1.2 Contribution des différents secteurs aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (Giec)

Depuis plusieurs années, le prix du carbone est resté beaucoup trop bas (5 à 7 € la tonne de CO₂ évité) pour avoir une influence réelle sur le comportement des industriels des secteurs concernés. Le chapitre suivant analyse la situation et indique les améliorations proposées par la communauté européenne et les recommandations de la plate-forme énergie d'Euro-CASE, fédération d'un grand nombre d'académies des sciences et d'académies des technologies de pays européens.

La COP15 de Copenhague

Du 7 au 18 novembre 2009, la conférence de Copenhague a réuni les délégations des 193 États signataires de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, soit 15 000 participants. Cent trente chefs d'État s'y sont rendus. En parallèle, et dans le même lieu, s'est déroulée la cinquième réunion des parties signataires du protocole de Kyoto (MOP 5 – *Meeting of the Parties*). Elle avait l'ambition d'établir un accord international contraignant (*binding*), qui fixerait la feuille de route de la gouvernance mondiale du climat sur la période 2013-2017.

Ce ne fut pas le cas. La Chine et les États-Unis se sont opposés à tout accord contraignant. Un accord incomplet dit « *de dernière minute* », présenté par 26 pays, a été signé effectivement à la toute fin de la conférence.

Les thèmes abordés lors de la COP15 ont été organisés de la manière suivante :

- *La vision partagée* : l'objectif global est que la température moyenne mondiale n'augmente pas dans le futur de plus de 2 °C comparée à celle correspondant à 1850², cette augmentation étant estimée à partir des modèles climatiques collationnés dans le dernier rapport du Giec (voir plus loin). En 2015, l'augmentation de la température moyenne est déjà de 0,8 °C par rapport à 1850. Selon le Giec, une augmentation au-delà de 2 °C aurait des conséquences très dommageables, par exemple concernant la montée du niveau de la mer, l'occurrence accrue de sécheresses, de nouveaux risques sanitaires, etc. Une diminution des émissions de GES d'au moins 50 % en 2050 par rapport à 1990 serait nécessaire pour limiter la hausse de la température. D'ici à 2020, les pays industrialisés devraient réduire les émissions de gaz à effet de serre de 25 à 40 %.
- *L'atténuation* : comment réduire les émissions de GES et avec quel calendrier.
- *L'adaptation aux changements climatiques* : comment anticiper les effets des changements climatiques.
- *Les technologies* : quelles sont les technologies, les pratiques, les modes de vie nécessaires pour lutter contre les changements climatiques.
- *Les financements* : quels investissements engager ?

Deux groupes de travail *ad hoc* ont été créés, l'un sur l'avenir du protocole de Kyoto pour la période post 2012, l'autre sur l'action future chargé de définir l'action globale à mener. Du 1^{er} au 12 juin 2009, les délégués de 183 pays se sont rencontrés à Bonn avec pour objectif de discuter les textes clés de la négociation servant de base aux accords sur le changement climatique à Copenhague. La première de la 7^e session du groupe de travail *ad hoc* sur la coopération à long terme s'est tenue à Bangkok, en Thaïlande, du 28 septembre au 6 octobre 2009.

2. Le début de l'ère industrielle est parfois fixé à la fin du Moyen-Âge. Le changement est sensible à partir de la fin du XVIII^e siècle avec le développement de la machine à vapeur, et significatif à partir de la moitié du XIX^e (les chemins de fer), puis à la fin de ce siècle (l'automobile, l'électricité, le téléphone), au début du XX^e siècle l'aviation, etc.

La suite de la session s'est tenue à Barcelone, en Espagne, du 2 au 6 novembre 2009. Le groupe de travail s'est ensuite rencontré lors de la 8^e session du groupe de travail *ad hoc* à Copenhague, concomitamment avec la quinzième conférence des parties qui a eu lieu à partir du 7 décembre.

Le protocole de Kyoto est l'instrument le plus important visant à lutter contre les changements climatiques. Il inclut l'engagement de 182 pays à réduire leurs émissions de GES, une des raisons probables du réchauffement climatique, pour la période 2008-2012. Copenhague avait pour but de prolonger la dynamique de Kyoto en assurant le développement post-2012 des différents dispositifs du protocole (exemple : mécanisme du marché du carbone).

L'enjeu de Copenhague était donc de fixer des objectifs précis de réduction des émissions de GES au-delà de 2012 et de décider de la répartition des efforts entre les pays :

- *Les États-Unis* : deuxième émetteur au monde de CO₂ avec 5 902 Mt en 2009 et qui n'avait pas ratifié le protocole de Kyoto, a accepté pour la première fois un objectif chiffré de réduction de ses émissions de GES : 17 % par rapport à 2005 d'ici 2020. Cela correspond à une diminution de 4 % par rapport à 1990, ce qui est en dessous des objectifs de Kyoto. Malgré ce progrès important, les États-Unis ont eu un rôle certain dans les négociations de Copenhague et leur échec ;
- *La Chine* : plus gros émetteur de CO₂ au monde avec 6 017 Mt en 2009, qui apparut comme l'un des pays les plus concernés par cette conférence ;
- *L'Union européenne* (alors composée de 27 pays) : elle a adopté une position ambitieuse dans la lutte contre le réchauffement climatique en proposant une réduction de ses émissions de GES de 20 % par rapport à 1990 d'ici 2020. Ce taux aurait pu atteindre 30 % en cas de succès de la conférence ;
- *Les États insulaires* : ces 47 nations regroupées au sein de l'AOSIS (*Alliance of Small Island States*) souhaitent tenter de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C en 2050 par rapport au niveau de 1850. La montée des eaux entraînerait la disparition de ces États. Leur poids politique sur la scène internationale était cependant très faible.

À l'issue de la conférence de Copenhague, un accord qualifié de « *dernière minute* » a été présenté, mais n'a pas été officiellement adopté par les 193 pays présents. Il est le résultat de négociations entre 26 pays, menées essentiellement à huis clos par les États-Unis, l'Inde, la Chine, le Brésil et l'Afrique du Sud. Les autres États ont « *pris note* » de l'accord lors de la séance de clôture. On peut noter que la Communauté européenne et ses pays-membres ont été très peu visibles ou audibles malgré les engagements européens forts en faveur d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, ce sont les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud / *Brazil, Russia, India, China, South Africa*) hors la Russie (qui est dans l'annexe 1) qui ont joué le rôle principal. L'année suivante, on racontait la blague suivante dans les milieux officiels à Washington : durant la COP de Copenhague, le président Obama errait dans les couloirs pour savoir où la Chine, l'Inde, le Brésil et l'Afrique du Sud se réunissaient...

La Chine et les États-Unis se sont opposés à la mise en place d'un accord contraignant impliquant des sanctions en cas de non-respect des objectifs. La Russie a refusé également un accord contraignant car son économie repose principalement sur l'exploitation d'énergies fossiles (ce n'est pas le seul pays dans ce cas).

Lors de la conférence de Copenhague, les États ont reconnu qu'une aide annuelle aux pays en développement de 100 milliards \$ dès 2020 serait nécessaire pour garantir la réduction des émissions de GES et l'adaptation de ces pays au changement climatique.

La déclaration finale a réaffirmé l'objectif de limiter le réchauffement de la planète à 2 °C par rapport à 1850, en faisant ainsi un objectif collectif. L'accord a rappelé la nécessité d'un financement spécifique pour les pays en développement afin de favoriser leur adaptation aux changements climatiques. Une aide annuelle de 100 milliards \$ a été prévue à partir de 2020.

En mars 2010, l'Inde et la Chine se sont officiellement associées à l'accord de Copenhague. Les résultats de Copenhague se sont peu à peu consolidés. Toutefois, l'accord issu du sommet de Copenhague a constitué une déception : l'accord n'est pas légalement contraignant, il ne propose pas d'objectifs chiffrés de réduction des gaz à effet de serre.

Les engagements de réduction de GES pris par les pays industrialisés à l'horizon 2020 restent inférieurs à la fourchette de -25 % à -40 % recommandée par le Giec afin de limiter la hausse de la température de la planète à 2 °C. Les promesses de réduction des GES des États correspondraient à une hausse de la température de 3 °C en 2050.

Aucun calendrier n'a été proposé pour parvenir à un accord légalement contraignant, ni pour définir l'après-Kyoto. Il n'y a pas de vision commune sur le climat et sur ses conséquences sur la vie des hommes sur notre planète.

Dans l'attente de la COP16, les dirigeants de la plupart des nations de la planète les plus vulnérables au changement climatique (l'Australie, le Brésil, la Chine, Cuba, les Fidji, le Japon, Kiribati, les Maldives, les Îles Marshall, la Nouvelle-Zélande, les îles Salomon et les Îles Tonga) se sont réunis dans la république des Kiribati, en Océanie, pour assister à une conférence spéciale dite *Tarawa Climate Change Conference* (TCCC), les 9 et 10 novembre 2010. Elle a élaboré la déclaration d'Ambo (*Ambo declaration*) qui appelle à une action plus immédiate contre les causes et les effets néfastes du changement climatique. La déclaration d'Ambo a été présentée à Cancun comme non contraignante.

La COP16 de Cancun

La COP16 s'est déroulée à Cancun au Mexique du 29 novembre au 10 décembre 2010. Elle devait prolonger les accords de la COP15 et préparer les suites du protocole de Kyoto.

Les groupes de travail *ad hoc* avaient été prorogés et deux organes subsidiaires permanents de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) se sont réunis : l'organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique et l'organe subsidiaire de mise en œuvre.

Depuis la réunion de Copenhague, la crise économique avait envahi le monde. Les conditions psychologiques avaient changé. En Europe, les émissions de GES avaient baissé du fait de la crise économique et de la réduction de l'activité économique que cette crise avait provoquée. La production de gaz et de pétrole de schiste commençait à prendre de l'ampleur aux États-Unis, préparant une révolution énergétique planétaire des ressources en hydrocarbures liquide et gazeux. Les soucis de climat et de biodiversité ne tenaient pas le devant de la scène.

Quatre réunions préparatoires (sessions de l'AWG-KP et l'AWG-LCA) ont été tenues en 2010, à Bonn (Allemagne) : 9-11 avril, 1-11 juin et 2-6 août. La quatrième réunion préparatoire s'est tenue à Tianjin, en Chine. Cette réunion a cristallisé les relations difficiles entre la Chine et les États-Unis. La rivalité de ces deux États dans le leadership mondial est apparue de plus en plus explicite. La Chine est devenue le premier émetteur de GES de la planète dépassant ainsi les États-Unis malgré une consommation par individu beaucoup plus faible. Elle est aussi devenue la deuxième puissance économique mondiale avec une ambition explicite à devenir la première. Les deux pays s'observent avec méfiance, partagés entre le souhait de ne gêner en rien leur propre économie et la crainte de voir l'autre prendre des initiatives qui lui assureraient un leadership dans la nouvelle économie de la transition énergétique et un leadership moral vis-à-vis des nations de la planète.

La COP17 de Durban

La COP17 s'est ouverte le 28 novembre 2011 à Durban, en Afrique du Sud, avec 183 pays participant à la conférence qui a accueilli 12 000 délégués.

Le 11 mars 2011 avait eu lieu au Japon un gigantesque tsunami qui avait provoqué l'accident nucléaire de Fukushima. La production d'électricité nucléaire est faiblement émettrice de GES, alors que la production par combustion de charbon ou de lignite en est fortement émettrice. Il y a donc une certaine logique, non partagée par les antinucléaire, à développer la production d'électricité nucléaire notamment dans les pays gros utilisateurs de charbon. L'accident de Fukushima a rebattu les cartes de la donne énergétique dans le monde. Le Japon a mis à l'arrêt tout son parc nucléaire, a augmenté ses importations de charbon dont le prix est bas et a recouru au GNL (méthane liquéfié transporté par voie maritime) pour faire face à la demande d'électricité et de chaleur de son industrie et des habitants. Le prix du gaz a été et continue d'être notamment plus cher en Asie qu'en Europe et surtout qu'aux États-Unis qui n'envisagent pas encore d'exporter le gaz de schiste (3 à 4 \$/Mbtu aux USA, environ 14 \$/Mbtu en Europe et 17 \$/Mbtu en Asie, notamment au Japon).

Le prix du pétrole est élevé à cette époque (plus de 100 \$/baril en moyenne sur l'année) et les États-Unis veulent sécuriser leur approvisionnement en pétrole grâce à l'*offshore* profond (l'accident du puits Macondo sur le champ *Deep Horizon* dans le golfe du Mexique a eu lieu le 20 avril 2010, mais personne aux États-Unis, n'envisage de renoncer ni à l'*offshore* profond ni au pétrole du grand Nord en Alaska). Contrairement aux hypothèses faites au début du millénaire, les énergies fossiles semblent relativement abondantes grâce aux progrès technologiques et scientifiques.

Trois réunions avaient préparé la réunion de Durban :

- les pourparlers de Bangkok sur le climat, du 3 au 8 avril 2011, où se sont réunis le 14^e groupe de travail sur l'action concertée à long terme (AWG-LCA-14) et le 16^e groupe de travail sur les nouveaux engagements des parties visées à l'annexe I du protocole de Kyoto (AWG-KP-16) ;
- les pourparlers de Bonn sur le climat, du 6 au 17 juin 2011 où se sont réunis les groupes de travail pour une session de reprise (AWG-LCA-14 *bis*, AWG-KP-16 *bis*). Les deux organes subsidiaires de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques se sont réunis pour la première fois depuis la conférence de Cancun (COP-16) ;
- les pourparlers de Panama sur le climat, du 1^{er} au 7 octobre 2011, où se sont réunis les groupes de travail pour une 3^e session de reprise (AWG-LCA-14 *ter* et AWG-KP-16 *ter*).

Dans son discours d'ouverture de la conférence, le président sud-africain Jacob Zuma a insisté sur les conséquences potentiellement désastreuses pour beaucoup d'habitants des pays en développement, « *question de vie ou de mort* », a-t-il dit.

Les pays les plus industrialisés s'étaient engagés à verser 100 milliards \$ par an à partir de 2020 pour aider les pays en développement à diminuer leurs émissions et à s'adapter aux modifications du climat. Un fonds mondial vert pour le climat (*Green Climate Fund*) est donc créé.

La déforestation fait l'objet d'un engagement spécial. Pour la ralentir ainsi que ses conséquences climatiques, le mécanisme Redd +³ permet aux pays forestiers de lutter efficacement contre la déforestation, de générer des crédits d'émission, cessibles sur le marché du carbone et des compensations.

Les pays en développement s'engagent à comptabiliser et publier leurs émissions, ainsi qu'à mettre en œuvre des actions nationales « *et appropriées* » pour diminuer, d'ici 2020, leurs émissions par rapport à un scénario sans changement.

3. Le REDD + *Reducing emissions from deforestation and forest degradation* est une initiative internationale de lancée en 2008 par les Nations unies (FAO, UNOP et UNEP). Ce programme vise à lutter contre le changement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre induites par la dégradation, la destruction et la fragmentation des forêts. Le programme UN-REDD de l'ONU soutient les initiatives nationales REDD+. Ce programme a actuellement une soixantaine de pays partenaires.

Ces actions sont inscrites dans un registre public, tenu par le secrétariat exécutif de la convention, ce qui n'est pas contraignant.

Est créé un comité de l'adaptation au changement climatique qui traite en particulier de l'accès à l'eau potable, des systèmes de santé, de la sécurité alimentaire et des écosystèmes protégés, notamment lacustres et marins.

Est créé également un comité exécutif de la technologie chargé d'accélérer les transferts technologiques du Nord vers le Sud.

Au cours de cette conférence, le protocole de Kyoto n'a pas été élargi, les 100 milliards de \$ annuels promis sont restés dans le flou, la réduction des émissions des pays riches n'a pas été traitée, même si l'Europe a pris des engagements forts (voir chapitre suivant).

Politiquement, les pays n'ont pas sensiblement évolué. Les États-Unis n'envisagent pas de remettre en cause le mode de vie des citoyens américains. Les aspects stratégiques passent bien avant le climat. Le gaz de schiste commence à prendre la place du charbon sur le continent nord-américain, mais la production d'huile de schiste augmente et va jouer un rôle majeur sur le niveau du prix mondial du pétrole. Les progrès dans les émissions de GES des USA proviennent du remplacement du charbon par du méthane (gaz de schiste), mais l'extraction dans les mines de charbon ne baisse pas ; or, à la fin, tout charbon extrait est brûlé, ici ou là. C'est au moment de l'extraction qu'il faut compter le futur CO₂ émis. Le charbon américain est exporté vers l'Allemagne ; abondant, son prix est bas. En Europe, cela revient près de deux fois moins cher de produire de l'électricité avec du charbon américain qu'avec du méthane en majorité russe brûlé dans des turbines à gaz à cycle combiné, même de dernière génération et de très haut rendement. (Le rendement des turbines à gaz à cycle combiné dépasse 60 % alors que celui des meilleures centrales à charbon ne dépasse pas 47 %).

D'un point de vue technique, l'accord accepte l'objectif d'un réchauffement moyen de 2 °C en précisant que ce réchauffement pourrait se traduire par des phénomènes de désertification, la fonte du pergélisol entraînant de nouvelles émissions de méthane (le méthane est un GES puissant) et affecter la biodiversité considérée comme un facteur de résilience pour les stratégies d'adaptation.

Le protocole de Kyoto est arrivé à échéance en 2012.

La Chine a proposé la prolongation de cet accord. Ceci ne lui demande pas d'effort, bien au contraire, puisqu'elle n'est pas dans l'annexe 1 et qu'elle est bénéficiaire des mécanismes de développement propre. Or, sa place dans le monde et ses émissions de GES ont modifié la donne depuis Kyoto. Le Brésil s'est joint à la Chine, en particulier pour critiquer le Canada et le Japon, trop réticents à leurs yeux.

L'idée de créer un fonds vert destiné à aider les pays en développement à faire face au réchauffement climatique a été un point central de la conférence. Les États-Unis s'y sont opposés.

Le 6 décembre 2011, le groupe des 77 pays en voie de développement a rejeté un premier accord avec l'argument que cet accord donne plus de flexibilité aux pays

développés alors qu'il augmente les contrôles pour les pays en développement. Le 9 décembre, un deuxième projet d'accord final a été rejeté par l'Union européenne, les pays africains et les pays insulaires, qui le jugeaient insuffisant.

Un accord final a été trouvé le dimanche 11 décembre 2011, avec 36 heures de retard :

- un accord sur la poursuite du protocole de Kyoto à compter du 1^{er} janvier 2013 ;
- un accord sur le mécanisme de fonctionnement du futur fonds vert. La question de l'abondement n'a pas été résolue.
- la plate-forme de Durban, *Durban Platform for Enhanced Action*, chargée d'élaborer un engagement juridique s'appliquant à tous les États. Le cadre juridique est aussi à élaborer. Cet engagement juridique serait souple et modulable.

C'est plus une déclaration d'intention qu'un accord, car il n'est pas juridiquement contraignant. Les États-Unis ont fait insérer dans le texte final une clause de sortie qui permet d'éviter que tout nouvel accord ne le soit.

Les États-Unis, la Chine et l'Inde se sont déclarés satisfaits, la Chine insistant sur la décision de mettre en œuvre la seconde période du protocole de Kyoto.

La commissaire européenne pour le climat, Connie Hedegaard, a considéré que « *l'essentiel est que toutes les grandes économies, toutes les parties en présence se sont légalement engagées sur l'avenir* ». En pratique, c'est à Durban que l'échéance de 2015 à Paris pour la signature d'un accord universel plus ou moins contraignant a été adoptée.

La COP18 de Doha

La COP18 a eu lieu à Doha au Qatar, du 26 novembre au 7 décembre 2012, étape charnière entre la première période d'engagement du protocole de Kyoto, la fin de la négociation pour 2012-2020 et la préparation d'un futur accord post-2020.

Un accord sur l'après-Kyoto (Kyoto 2) a finalement été entériné lors de ce sommet en décembre 2012. Cette prolongation des engagements porte sur la période 2013-fin 2020 et concerne 37 pays industrialisés (qui génèrent seulement 15 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre).

La COP19 de Varsovie

La COP19 s'est tenue à Varsovie du 11 au 22 novembre 2013. La France a été très active, notamment par la présence de son ministre des affaires étrangères, Laurent Fabius. Depuis la COP17 de Durban, la communauté internationale dispose d'un agenda, un accord universel relativement contraignant doit être signé en décembre 2015 à la COP21 à Paris et entrer en vigueur en 2020.

Les gouvernements ont accepté de fournir leurs contributions à l'accord universel bien avant la date de la COP21. Le projet de texte officiel est présenté en mai 2015. Les systèmes de surveillance, de contrôle, de vérification des engagements nationaux ont été finalisés de façon à ce que l'accord de 2015 ait un fondement solide.

Durant la conférence de Varsovie, un accord a été adopté à propos des pertes et dommages subis par les pays en développement à cause du réchauffement climatique. Cet accord porte sur les aspects institutionnels. Un comité exécutif est chargé de la mise en œuvre provisoire en vue d'une réévaluation en 2016. Les règles concernant la réduction provenant du déboisement et de la dégradation des forêts ont été approuvées. L'organisation du fonds vert progresse.

La COP19 a invité les entreprises, les villes, les régions, la société civile à présenter des actions ou opérations en faveur de la réduction des émissions de GES.

Les 48 pays les moins avancés ont proposé des plans détaillés pour lutter contre les effets des changements climatiques. Ces plans sont destinés à évaluer les changements et à déterminer l'aide et les mesures permettant d'améliorer la résilience. Les pays industrialisés ont mobilisé 100 millions \$ pour alimenter le fonds pour l'adaptation. C'est une sorte d'anticipation de ce que devra être le fond vert dont on reparle durant la COP 21.

Le centre et réseau de technologie climatique (CTCN), établi à Cancun en 2010, est prêt à démarrer. Son objet est de stimuler la coopération en matière de technologie et le transfert technologique dans les pays en développement.

La COP20 de Lima

Elle a eu lieu du 11 au 14 décembre 2014.

La chute non anticipée du prix du pétrole est survenue au milieu de l'année. Le prix du gaz était déjà très bas aux États-Unis qui s'apprêtaient à exporter ce gaz par voie maritime sous forme de GNL, le prix du charbon baissait encore en grande partie du fait des exportations américaines : le charbon extrait ne trouvant plus preneur sur le sol des USA, les producteurs furent autorisés à l'exporter sur le marché mondial, ce qui a fortement augmenté l'offre à demande constante et donc fait baisser les prix mondiaux. Et voici que le prix du pétrole chute. La production de pétrole de schiste avait cru à un rythme tel que les États-Unis se trouvaient autosuffisants en pétrole. On retrouve la période initiale du pétrole *onshore*, où les coûts d'investissement et les délais de mise en route sont courts. Aujourd'hui comme hier, les technologies de repérage, d'évaluation, de forage, de fracturation de la roche-mère progressent rapidement, ce qui diminue encore le coût de développement des pétroles de schiste aux États-Unis. Le droit minier américain, qui donne à chaque propriétaire les droits sur son sous-sol, encourage ce développement un peu anarchique, mais industriellement, terriblement efficace. Les ressources *offshore* profondes et les ressources du grand Nord semblent soudain bien capitalistiques et longues à mettre en œuvre,

comparées à ce renouveau du pétrole *onshore* tellement plus rapide, flexible et peu capitalistique. Pour le pétrole, le temps économique a changé.

Les ressources fossiles apparaissent comme abondantes et bon marché. Ce n'est pas une bonne nouvelle pour les émissions de gaz à effet de serre. Il faut de plus en plus de conscience climatique et d'esprit de solidarité pour adhérer à une vision planétaire de préservation du climat et renoncer à l'usage des combustibles fossiles qui, contrairement aux annonces du début du siècle, ne sont ni rares ni coûteuses. Alors, on peut noter une certaine tendance à l'imprécation. Par exemple, Al Gore, le vice-président des USA, déclare : « *Que répondra-t-on à nos enfants quand le monde sera ravagé, peuplé par des milliards de réfugiés ?* ». Il n'arrive guère à convaincre ses concitoyens américains.

En dehors des catastrophes naturelles imputables au changement climatique, destructrices, mais relativement brèves, il n'y a pas de vraisemblance particulière à imaginer un changement climatique soudain et brutal. Si le changement climatique est progressif et variable selon les latitudes et les régions géographiques, alors les habitants de la planète développeront progressivement des capacités d'adaptation à condition que la solidarité internationale joue son rôle.

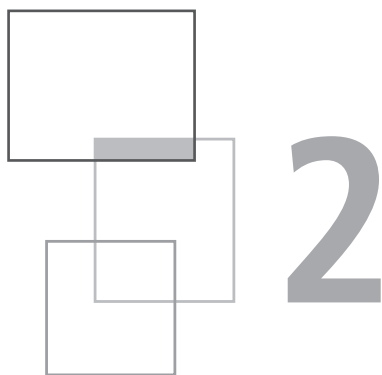
Raison de plus pour accorder tous les efforts à la réussite de la réunion de Paris.

La conférence de Lima a travaillé sur les engagements et plans nationaux pour la période post-2020, la question des mesures des engagements pris et de la transparence des opérations, le financement des fonds et notamment du Fond Vert et la trajectoire des émissions globales de GES.

Lors de leur session à Genève, en février 2015, les pays de la CCNUCC ont produit le texte officiel sur lequel sont basées les négociations de fond.

Lors de la conférence de Bonn, en juin 2015, les parties ont chargé les coprésidents du groupe de travail *ad hoc* sur la plate-forme de Durban d'élaborer une action renforcée, afin d'atteindre un nouvel accord, et de publier une version consolidée du texte formel de Genève de février 2015 en tant qu'outil pour aider les gouvernements dans leurs négociations.

Le 24 juillet 2015, les coprésidents du groupe de travail *ad hoc* ont publié ce document qui clarifie ce que pourrait être le contenu de l'accord juridique émergent, quelles décisions pourraient être prises au moment où l'accord sera adopté et quelles autres décisions devront être prises pour le rendre pleinement opérationnel avant son entrée en vigueur en 2020. D'autres sessions sont alors prévues à Bonn en août/septembre et octobre 2015.



La COP21 de Paris

Déjà à Varsovie, durant la COP19, la France a été très active, notamment par la présence de son ministre des affaires étrangères, Laurent Fabius. Depuis la COP17 de Durban, la communauté internationale dispose d'un agenda, un accord universel relativement contraignant doit être signé en décembre 2015 à la COP21 à Paris et entrer en vigueur en 2020.

Le gouvernement français considère essentiel que « *cet objectif prenne en compte le principe d'équité et de responsabilité commune, mais différenciée, et les capacités respectives, en tenant compte des circonstances nationales* ».

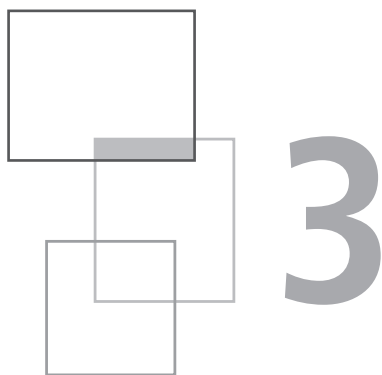
L'accord universel doit « *unir les nations dans une vision planétaire* » afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre à un rythme suffisant selon les estimations du Giec.

Or il apparaissait illusoire de vouloir imposer à tous les pays un objectif unique, quelle que soit la formulation retenue. L'originalité de la démarche est d'être passé d'un objectif imposé à un objectif choisi. Chaque pays choisit et expose ses engagements, appelés Contribution décidée à l'échelle nationale (*Intended National Declared Contribution*). Tous les citoyens du monde peuvent connaître les engagements de chaque pays, les plus grands comme les plus petits. Ces engagements seront revus tous les cinq ans et tout le monde pourra constater l'évolution des engagements. C'est le jugement collectif de toutes les femmes et de tous les hommes qui devrait permettre d'inciter les pays à ajuster leur engagement dans un sens d'efficacité et d'équité.

C'est probablement dans cette nouvelle approche diplomatique que se situe le basculement de cette COP21. Et c'est en même temps un tournant dans la gouvernance

mondiale et une nouvelle évolution positive de ce que les spécialistes de sciences politiques appellent le « système post-westphalien ».

Le déroulement de la COP21, les décisions et engagements de l'accord de Paris sont exposés à partir de la page 129.



Un exemple de conséquences du changement climatique : l'élévation du niveau moyen des mers et océans

(François Lefaudeux)

La montée du niveau moyen des océans est bien documentée. Deux phénomènes principaux sont à l'œuvre :

- la fonte des glaces de terre (eau douce) ; glaciers un peu partout dans le monde, mais plus encore la fonte de la calotte glacière du Groenland déjà bien amorcée, celle de la calotte polaire antarctique, prévue par les modèles, mais encore en phase de démarrage ; les calculs montrent que la fonte complète de l'inlandsis groenlandais conduirait à une montée des eaux d'un peu plus de 7 mètres (Wikipedia), la fonte de l'inlandsis antarctique doublerait largement cette variation de niveau ;
- le réchauffement de la masse d'eau des océans. Cet échauffement entraîne une dilatation en volume de l'eau. Le raisonnement est simple : la hauteur d'eau moyenne des océans est de 4 000 mètres. Le coefficient de dilatation volumique de l'eau est complexe, puisqu'il passe par un minimum vers la température de + 5 °C pour les eaux de différentes compositions chimiques, dont les eaux de mer assez salées. À 10 °C ce coefficient est proche de 1,0002 par degré et avec

une augmentation notoire de ce coefficient quand la température s'élève... la figure suivante (figure 3.1) est bien connue, voir par exemple gte.univ-littoral.fr/workspaces/documents-m-perrot/cours-thermo-1er.

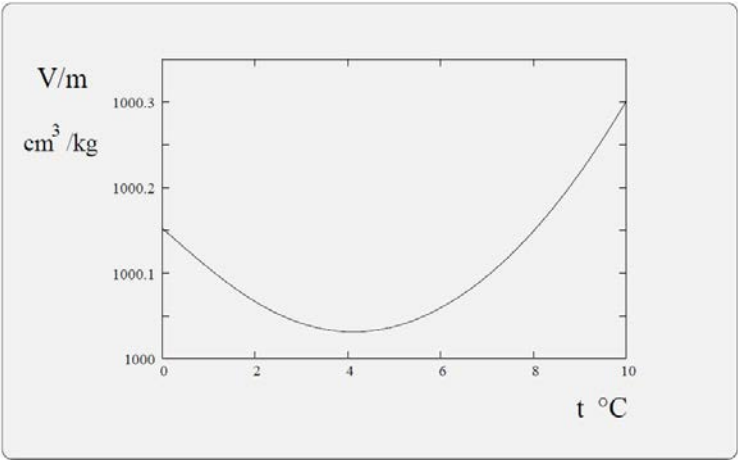


Figure 3.1 Dilatation de l'eau de mer en fonction de la température – source : université du littoral

Soit, tant que les eaux froides de profondeur ne sont pas remontées à plus de 5 °C, sur la base d'un coefficient moyenné sur la colonne d'eau de 1,0001 et une profondeur moyenne des océans de 4000 m, une élévation du niveau moyen de la mer de 0,4 m par degré. Ultérieurement en cas de réchauffement très important le niveau pourrait s'élever de plus de 1 m par degré.

Ces quelques chiffres sont des ordres de grandeur, ils n'ont pas valeur scientifique, mais ils montrent que si le réchauffement se poursuivait assez longtemps et, surtout, s'amplifiait, le changement du niveau des mers pourrait devenir très significatif.

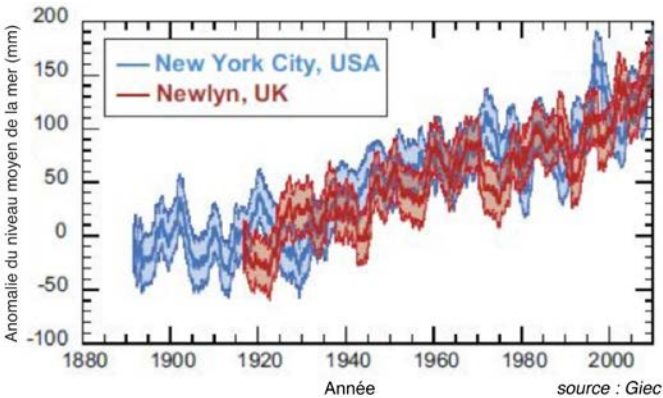


Figure 3.2 Variation sur plus d'un siècle du niveau de la mer de part et d'autre de l'Atlantique

Les études faites indiquent avec une bonne fiabilité que l'élévation du niveau des mers a déjà été au XX^e siècle de l'ordre de 20 cm, comme le montre cette courbe (figure 3.2) extraite d'un rapport du *Giec* qui montre une similitude forte entre les deux rives de l'Atlantique nord.

Les satellites spécialisés montrent qu'en moyenne annuelle la pente est plutôt aujourd'hui de 3 à 3,5 mm ce qui ferait en extrapolant linéairement 35 cm sur le XXI^e siècle ou, en faisant l'hypothèse d'une accélération (ce que fait le *Giec* en utilisant de manière que certains jugent encore assez timorée les modèles de réchauffement), une augmentation de niveau pouvant dépasser 0,6 m sur le siècle même si des efforts importants de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre sont faits...

Fait incontournable, l'océan accumule de plus en plus d'énergie thermique comme le montre les courbes de la figure suivante (figure 3.3), toujours du *Giec* :

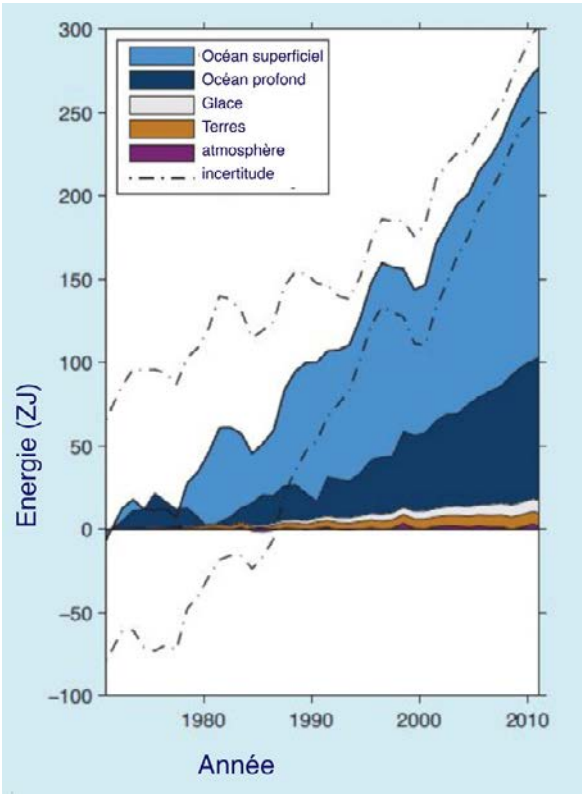
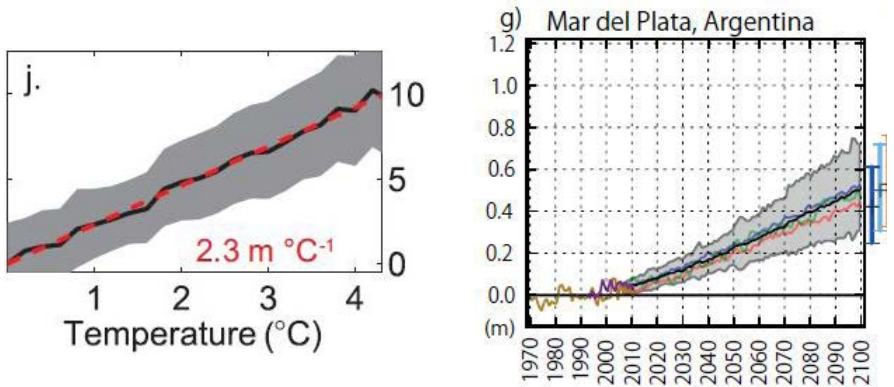


Figure 3.3 Évolution de l'accumulation d'énergie en ZJ dans les différentes composantes du système climatique terrestre de 1971 à 2010. Le réchauffement de l'océan est le facteur principal. L'océan superficiel contribue plus que l'océan intermédiaire et profond. La fonte des glaces (en gris clair) contribue depuis 1992 pour le Groenland et l'Antarctique, la glace de mer arctique contribue de 1979 à 2008. Les incertitudes sur l'énergie absorbée par les océans dominent la fourchette d'incertitude (intervalle de confiance de 90 %). Source : GIEC

L'océan joue clairement un rôle considérable de lissage climatique en accumulant des quantités d'énergie colossales⁴, ce qui est actuellement positif, mais il devient aussi de ce fait une énorme bombe à retardement, ce qui ne peut qu'inquiéter, car cette accumulation va avoir des conséquences lourdes sur l'évolution du climat et ces phénomènes ne peuvent être que très lentement réversibles. Ces centaines de zetajoules vont peser très longtemps sur le climat ! On notera que l'intervalle de confiance se réduit d'année en année, autrement dit, la mesure a fait et continue à faire d'énormes progrès. Plus immédiatement le réchauffement des océans a de nombreuses conséquences, notamment sur les ressources halieutiques, mais l'élévation du niveau de l'océan mondial (augmentation moyenne du niveau de l'ensemble des mers du globe) constitue une menace pour les États insulaires de type atoll et les populations des deltas et autres plaines côtières très basses...

Le *Giec* consacre tout un chapitre à l'évolution du niveau de la mer. Voici deux schémas intéressants extraits de ce chapitre (figure 3.4) :

Mar del Plata est assez représentatif.



Les hauteurs (ordonnées) sont en mètres.

Mar del Plata est assez représentatif.

Figure 3.4 À gauche il s'agit de la corrélation entre valeur du réchauffement et hauteur des océans, l'équilibre une fois atteint ; à droite des extrapolations de l'évolution du niveau moyen de la mer, ici à Mar del Plata, au fil de ce siècle, dans les hypothèses moyennes retenues par le *Giec* pour quantifier le réchauffement (à commencer, bien sûr par des rejets anthropiques de CO₂ contraints, mais la liste est très longue...)

Même en supposant que les experts du *Giec* n'aient pas minimisé le phénomène (c'est une critique qui leur est parfois faite par les pessimistes, alors que les détracteurs de ces travaux, qui les considèrent comme des affirmations sans fondement

4. Le zetajoule peut ne pas parler au lecteur. Un zetajoule (10²¹), l'unité utilisée dans cette figure du *Giec* et également utilisée ailleurs dans ce document, représente la production annuelle d'un parc de 20 000 centrales nucléaires. L'océan accumule aujourd'hui plus de cinq zetajoules/an !

sérieux, estiment qu'il n'y a pas matière à agir), les conséquences directes sur les populations peuvent être très importantes, ceci d'autant plus que pour de très nombreuses raisons le XX^e siècle a vu une migration importante des populations de l'intérieur des terres vers les zones côtières. Ces migrations de grande ampleur se poursuivent actuellement.

L'augmentation du niveau moyen de la mer, l'accentuation d'autres phénomènes, comme les tempêtes auront (et ont déjà) comme conséquences, si rien n'est fait, la submersion des zones côtières basses (par exemple du marais poitevin en France), des difficultés croissantes des Pays-Bas à protéger leur territoire, déjà largement en dessous du niveau des hautes mers, et, autre phénomène, une accélération sensible de l'érosion côtière dans les zones de côte haute (par exemple accélération du recul des falaises d'Étretat).

Même en l'absence d'envahissement visible, la pression plus grande sur les nappes phréatiques côtières peut rendre impropre à la consommation les nappes d'eau douce actuellement utilisées.

Les îles basses, atolls du Pacifique (figure 3.5) et de l'océan Indien, sont déjà, et continueront d'être, les plus fortement touchés. On prévoit que beaucoup de ces îles devront être abandonnées par leurs populations. Au cours des montées précédentes du niveau de la mer, l'activité corallienne a permis leur rehaussement au rythme même de cette montée. Il n'en va plus de même pour l'épisode actuel, ceci pour deux raisons : la vitesse de l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans (par l'absorption et la dissolution de plus en plus de CO₂) qui entraîne la mort des coraux.



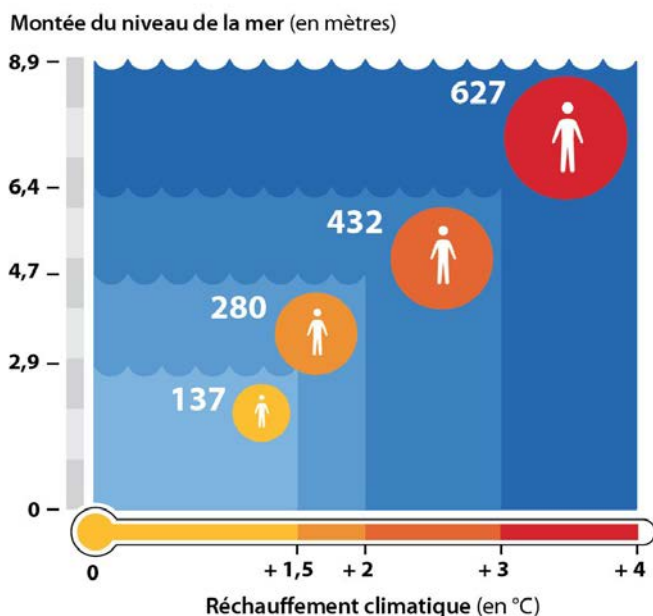
Figure 3.5 Tuamotus (photo François Lefaudeux)

Les grands deltas sont également menacés, Le delta du Nil pourrait être bientôt au moins partiellement submergé, le delta du Mississippi pourrait lui aussi être menacé. Le Bangladesh, dans le delta du Gange et du Brahmapoutre risque d'être réduit à une peau de chagrin, sa population condamnée à émigrer massivement. Les populations concernées se chiffrent en dizaines de millions d'individus...

La figure 3.6 suivante, reprise par le site Futura sciences, extrapole assez nettement sur les prévisions à un siècle du *Giec*, mais correspond aux évaluations du *Giec* quant au niveau stabilisé en fonction de la température atteinte. Elle est en soi très intéressante – et inquiétante (les populations indiquées sont les populations actuelles, pas les populations futures) :

L'impact du réchauffement climatique sur le niveau de la mer et la population

Population dont le domicile serait sous le niveau de la mer, en millions, en 2010, selon le degré de réchauffement



Source : Climate Central



Figure 3.6 Populations touchées par la montée du niveau de la mer

En Europe même, on pense immédiatement aux Pays-Bas, mais le phénomène, sur le delta du Rhin concerne aussi Anvers. Des conséquences importantes sont à prévoir sur la Tamise. En France, tout le littoral du delta du Rhône à Collioure est menacé, avec toutes les villes côtières, anciennes ou modernes qu'ils comportent.

En Italie c'est le delta du Pô. On pense immédiatement à Venise et sa lagune, les travaux en cours pour éviter les *acqua alta* se révéleront probablement très

insuffisants... Mais le problème ne sera pas localisé à la lagune : toute la côte du fond de l'Adriatique, pratiquement de Ravenne à Trieste, est une côte basse.

Une cartographie des populations concernées sur l'ensemble du monde a été établie (figure 3.7 — la source est indiquée sur la figure) :

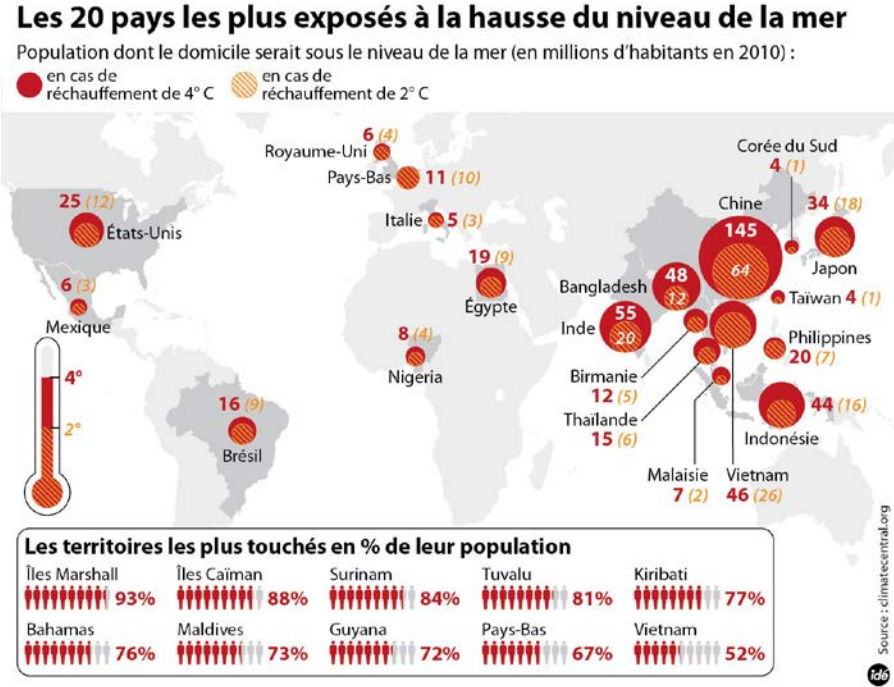


Figure 3.7 Localisation des populations touchées par la montée du niveau de la mer

Il y a deux niveaux de température, 2 et 4 °C. Comme pour le graphique précédent, il convient de bien noter qu'il s'agit des populations présentes en 2010. Elles sont déjà en plusieurs « points chauds » bien plus nombreuses !

On ne peut évoquer de solution unique à cette évolution globale. Chaque lieu est un cas particulier fonction de la géographie physique et tout autant de la géographie humaine : New York est bâtie sur la roche dure, la population est dense et riche. Le delta du Gange est immense, terre et eau se confondent, la population est nombreuse, mais infiniment pauvre. Les atolls des Tuamotu sont en majorité peu peuplés et du point de vue géographie physique il s'agit de bandes de terre et de platiers très étroits quasi impossibles à protéger ! Dans un autre environnement, quid de Djakarta ?

Un exemple : on ne voit guère d'autre solution pour les Pays-Bas que de rehausser et renforcer l'ensemble de leur dispositif (figure 3.8), avec un volume de travaux encore plus considérable que ceux entrepris après le désastre de 1956, mais pour le Bangladesh ?



Figure 3.8 Afsluitdijk Pays-Bas (au total les Pays-Bas sont protégés par 1 000 km de digues) ! – source Wikimedia commons

Seule remarque à caractère général : la prévision sur un siècle du *Giec* montre une montée du niveau des eaux régulière et sans signe d'essoufflement. Il était impossible au *Giec* d'aller de manière quantitative au-delà du siècle avec un minimum de crédibilité scientifique, mais il est quasi certain que le phénomène ne va pas pour autant s'arrêter brutalement au 1^{er} janvier 2101 ! D'ailleurs le *Giec* est allé plus loin en se prononçant sur les niveaux stabilisés en fonction de l'accroissement moyen de température du globe Autrement dit, il appartient aux gouvernements de déterminer l'horizon auquel ils s'intéressent et, au minimum, de mettre en œuvre des solutions qui ne soient pas à passer par pertes et profits si le niveau de l'océan sur leurs côtes après avoir atteint 60 cm, passe dans la continuité à 61 cm ! Avec une augmentation qui sera sûrement atteinte de 1,5 °C et même nettement dépassée (référence niveaux préindustriels – c'est-à-dire le milieu du XIX^e siècle comme indiqué ailleurs dans cet ouvrage) l'augmentation de niveau pourrait atteindre à terme, nous dit le *Giec*, presque 3 m !

Avec une telle augmentation, c'est tout le littoral poitevin qui est menacé, l'essentiel des îles comme l'île de Ré, tout le Languedoc-Roussillon, la côte-ouest du Cotentin, l'estuaire de la Somme, celui de la Gironde (et entre autres la ville de Bordeaux), les villes portuaires comme Le Havre et la Rochelle, Cherbourg, Toulon, etc. Même si on peut critiquer ces extrapolations, se voiler la face serait contraire à toutes les règles de prévention qui s'imposent (prévention et non précaution, car s'il y a une certaine incertitude sur la valeur exacte, il y a quasi consensus sur la réalité de l'évolution — voir commentaires sur précaution et prévention en début d'ouvrage).

Même les Américains, y compris certains élus républicains, s'inquiètent de l'évolution du climat. Ainsi, des « Keys », à la côte du Maine, les municipalités côtières réfléchissent aux enjeux, comme le montre cette planche (figure 3.9) publiée par le *Washington Post* et extraite d'une étude pour Virginia Beach.

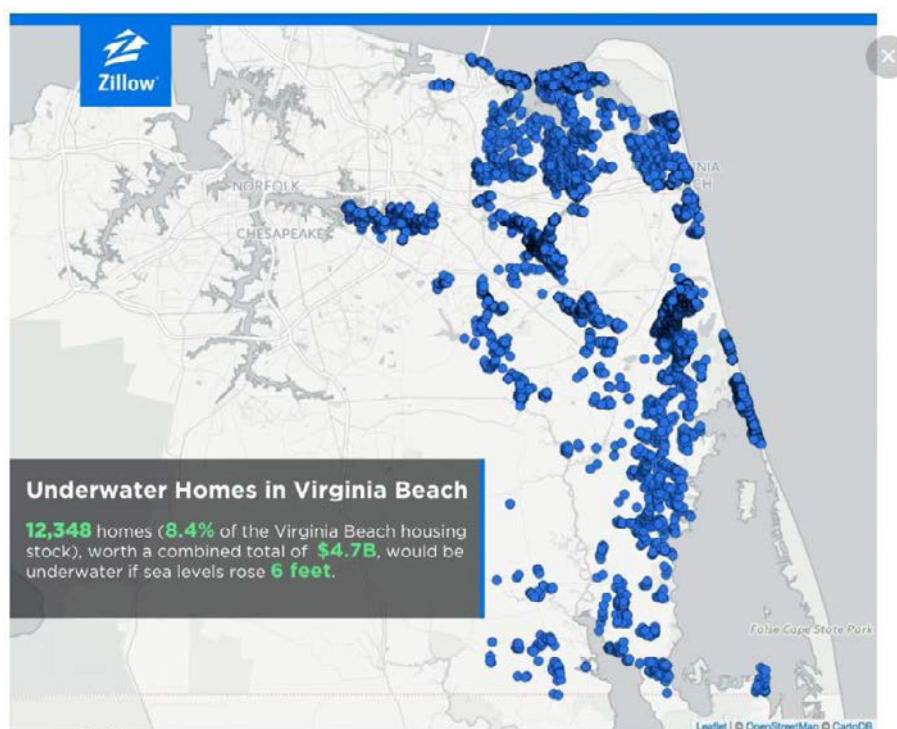


Figure 3.9 Étude locale de l'incidence de la montée de eaux (Virginia Beach) – publié par le *WashingtonPost*

L'exposé précédent est volontairement centré sur les aspects déplacements de populations, mais la hausse du niveau des mers et l'acidification des océans ont de nombreuses autres conséquences potentiellement extrêmement dommageables ; l'une d'elle, encore liée à l'augmentation de la hauteur d'eau, sera la disparition de nombreuses mangroves, comme celles, pour ce qui concerne la France, de Guyane.



Les 20-20-20 ou la voie de l'Union européenne

En décembre 2008, l'Union européenne a adopté ce qui a été appelé le « paquet climat-énergie », ou plan climat nommé « plan 20-20-20 ». C'est un plan d'action destiné à lutter contre le réchauffement climatique dans l'Union européenne. Les 27 chefs des États-membres l'ont adopté lors du conseil européen de Bruxelles les 11 et 12 décembre 2008. Le Parlement européen, puis le Conseil des ministres, l'ont adopté au mois de décembre de la même année.

Le paquet climat-énergie 20-20-20 de 2008 a été nommé ainsi car il propose trois axes de changement pour une échéance en 2020 :

- faire passer la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen à 20 % ;
- réduire les émissions de CO₂ des pays de l'Union de 20 % ;
- accroître l'efficacité énergétique de 20 % d'ici à 2020.

Les deux premières mesures sont en principe contraignantes, la troisième ne l'est pas. Il faut dire qu'elle n'est pas aisément mesurable. Il faut non seulement parvenir à mesurer l'efficacité énergétique collective et globale d'un pays, mais aussi le faire de manière comparable pour chaque État-membre.

On peut noter que le paquet climat-énergie choisit de concentrer les efforts à faire sur l'énergie, alors que l'Europe est une puissance agricole et maritime. Les océans, les sols, la forêt, l'agriculture et les grands fleuves jouent un rôle dans l'économie du gaz carbonique, du méthane et des autres gaz à effet de serre. C'est un choix sur lequel il faudrait revenir à l'avenir. En effet, avec le recul et l'avancée des réflexions

du Giec et du monde des chercheurs, il se confirme que ces sujets proches de la nature et des sciences de la terre et du vivant contiennent une part importante du champ explicatif du comportement de la planète. Tous ces effets interagissent entre eux et peuvent se compenser ou se renforcer. Ils interagissent aussi avec les émissions qui dépendent directement de l'action des hommes, et notamment la combustion des matières fossiles.

Ce plan 20-20-20 s'inscrit dans un cadre législatif et réglementaire associé avec l'histoire énergétique européenne. Ce cadre s'est développé depuis la constitution initiale de l'Europe. Il a évolué progressivement et continûment.

Le cadre énergétique européen

Les traités européens ne prévoient pas de politique commune ni même cohérente de l'énergie, bien que ce soit le secteur énergétique qui a servi de fondement à la construction européenne, avec la CECA (1951) et la CEEA (1957).

L'article 194 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, signé le 25 mars 1957 à Rome par l'Allemagne, la France, l'Italie et les trois pays du Benelux, pose le fondement d'une politique européenne de l'énergie reposant sur le fonctionnement du marché de l'énergie, sur la sécurité de l'approvisionnement énergétique, sur l'efficacité énergétique, les économies d'énergie et les énergies nouvelles et renouvelables, et enfin sur l'interconnexion des réseaux.

Il rappelle que les États-membres sont libres dans la détermination de leur bouquet énergétique et de leurs sources d'approvisionnement ainsi que dans l'exploitation de leurs ressources énergétiques.

Au sommet de Lisbonne des 23 et 24 mars 2000, les chefs d'État et de gouvernement des États-membres ont affirmé leur volonté « *d'accélérer la libéralisation dans des secteurs tels que le gaz et l'électricité* ». Le conseil de l'Union européenne du 25 novembre 2002 a décidé que la libéralisation des marchés pour les clients non résidentiels serait accomplie au plus tard le 1^{er} juillet 2004 et qu'elle serait accomplie pour tous les clients au plus tard le 1^{er} juillet 2007.

Ces accords se sont traduits dans plusieurs textes adoptés en juin 2003.

En décembre 2003, le conseil de l'Union européenne a décidé de « *la stratégie européenne de sécurité* » dans le cadre de la politique étrangère et de sécurité commune. En 2006, un livre vert sur l'énergie énonce les bases de l'approche énergétique de l'Union européenne. En 2008, un rapport s'inquiète que « *la diminution de la production (de pétrole et de gaz) en Europe signifie qu'en 2030 jusqu'à 75 % du pétrole et du gaz devront être importés* ». Ce qui semble faire implicitement l'hypothèse que les hydrocarbures conventionnels continueront de jouer un rôle majeur. Il s'inquiète du faible nombre de fournisseurs de gaz hors Union européenne (Russie, Norvège, Algérie) et « *des prix du pétrole et du gaz qui sont en hausse, et devraient se maintenir à des niveaux élevés* ». Il confirme la conviction, alors partagée par tous, que le « pic

pétrolier » s'approche et note qu'il existe un risque de changement climatique, si l'on ne développe pas des énergies alternatives aux énergies fossiles.

Aujourd'hui, les fondamentaux qui paraissaient certains à cette époque ont beaucoup changé, mais le cadre de réflexion d'aujourd'hui reste marqué par les prémisses d'hier. L'extraction des pétroles et des gaz de schiste, qui a démarré il y a dix ans aux États-Unis, demeure un phénomène nord-américain sans développement réel en Europe, au moins pour l'instant. Le désengagement militaire stratégique des États-Unis au Moyen-Orient du fait de son autosuffisance en pétrole et en gaz, les nouvelles ressources d'uranium, tout ceci se déroule sous les yeux de l'Europe sans qu'elle ne modifie sa feuille de route énergétique. Actuellement, l'Europe n'a de problème d'approvisionnement ni en charbon, ni en pétrole. Le marché est abondant et les prix paraissent incroyablement bas si on les analyse avec les convictions de 2008. Pour le gaz, les relations difficiles avec la Russie créent une tension pour les États-membres de l'est de l'Europe, mais l'Allemagne et *a fortiori* la France ou l'Espagne ont des approvisionnements très diversifiés, en particulier grâce au GNL livré par voie maritime. Sur le continent européen, du point de vue énergétique, que se passe-t-il ? Réponses : la sortie du nucléaire de l'Allemagne qui s'accompagne du développement de l'extraction du charbon et du lignite dans le pays, le démarrage difficile de l'EPR (initialement *European Pressurized Reactor*, puis, pour l'exportation, *Evolutionary Power Reactor*) génération III de la production nucléaire d'électricité, et le développement (très) rapide des énergies renouvelables intermittentes, notamment en Allemagne et en Espagne.

Avant même le plan 20-20-20, et avant tous ces changements récents, l'Union européenne considérait que la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et le souci du climat étaient des questions majeures.

Le livre vert de 2006 définit les domaines prioritaires, et en particulier :

- achever de mettre en place les marchés intérieurs européens de l'électricité et du gaz ;
- garantir la sécurité d'approvisionnement et la solidarité énergétique entre les États ;
- définir une politique extérieure cohérente en matière d'énergie ;
- développer une approche intégrée de lutte contre le changement climatique.

C'est ce dernier point qui débouche peu de temps après sur le paquet 20-20-20. Les conséquences de ce paquet 20-20-20 ne sont réellement compréhensibles que si on analyse en profondeur les conséquences de deux prémisses qui sont latentes depuis la fin du XX^e siècle et même avant :

- le marché de l'électricité et du gaz est libre ;
- chaque État-membre est libre de sa politique énergétique et notamment des politiques d'incitations.

La libéralisation du marché de l'énergie a joué et joue un rôle majeur dans la fixation du prix de l'électricité et, dans une moindre mesure, du gaz. Le marché intérieur de l'énergie a fait l'objet de directives et de règlements successifs. La libéralisation des marchés de l'énergie a commencé en 1997 pour l'électricité (directive 96/92/CE) et en 2000 pour le gaz naturel (directive 98/30/CE).

En 2012, et donc à la lumière des développements rapides du plan 20-20-20 et des problèmes engendrés par le développement très rapide des énergies renouvelables intermittentes pour la production d'électricité, la Commission européenne suggère l'adoption de nouveaux critères d'aides au développement de sources d'énergie renouvelables. Cette communication s'appelle « *Pour un bon fonctionnement du marché intérieur de l'électricité* ». En 2013, dans une communication, un nouveau cadre réglementaire européen est présenté dans lequel les tarifs d'achat ne seraient plus appliqués. Des tarifs préférentiels encourageraient les producteurs d'énergie renouvelable (intermittente) à s'adapter aux conditions du marché de l'énergie, comme cela se pratique par exemple en Californie. Les aides nationales devraient respecter un cadre général européen basé sur une analyse des coûts comparatifs. Cette analyse devrait être entreprise par la Commission en complément des travaux engagés par l'OCDE et l'Agence internationale de l'énergie (cf. loi espagnole de décembre 2013).

Les problèmes sérieux nés de l'application du plan 20-20-20 dans les États-membres n'échappent pas à l'Union européenne, mais si les éléments macroéconomiques planétaires étaient difficilement prévisibles, en revanche les conséquences d'un développement non maîtrisé et non accompagné des énergies renouvelables intermittentes étaient parfaitement prédictibles et auraient dû l'être.

Un troisième paquet-énergie a été adopté le 13 juillet 2009. Il concerne en particulier le gaz et l'électricité :

- la séparation effective entre la gestion des réseaux de transport d'une part, et les activités de fourniture et de production d'autre part. C'est ce qui a provoqué en France la création de RTE et ERDF dans le domaine de l'électricité et GRT et GRDF dans le domaine du gaz. Cette séparation a, en principe, pour objet de favoriser la concurrence en évitant qu'un opérateur (en France, EDF pour l'électricité et ENGIE pour le gaz) ait le contrôle de l'ensemble de la chaîne de production et de distribution et soit donc en capacité de limiter l'intervention de nouveaux acteurs ;
- la création d'une agence de coopération des régulateurs de l'énergie afin de favoriser l'interconnexion des marchés énergétiques et d'accroître la sécurité d'approvisionnement en cas de surcharge de la demande ou d'incident sur un marché national et le développement d'une surveillance réglementaire ;
- la transparence et la conservation des données ;
- l'accès aux installations de stockage et de GNL.

Le paquet comprend cinq textes :

1. le règlement (CE) n° 713/2009 instituant une agence de coopération des régulateurs de l'énergie ;
2. le règlement (CE) n° 714/2009 sur les conditions d'accès au réseau pour les échanges transfrontaliers d'électricité (abrogeant le règlement (CE) n° 1228/2003) ;
3. le règlement (CE) n° 715/2009 concernant les conditions d'accès aux réseaux de transport de gaz naturel (abrogeant le règlement (CE) n° 1775/2005) ;

4. la directive 2009/72/CE concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité (abrogeant la directive 2003/54/CE) ;
5. la directive 2009/73/CE concernant des règles communes pour le marché intérieur du gaz naturel (abrogeant la directive 2003/55/CE).

Les deux directives doivent être transposées dans le droit des États-membres.

Le paquet climat-énergie 20-20-20

Le paquet climat-énergie comprend quatre textes datés du 23 avril 2009, notamment pour la promotion de l'utilisation de l'énergie produite par des sources renouvelables (directive 2009/28/CE) et pour préciser les efforts à fournir par les États-membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin que la communauté européenne puisse respecter ses engagements en 2020 (décision n° 406/2009/CE).

On peut rapprocher ce paquet climat-énergie d'un autre texte adopté simultanément et relatif aux émissions des voitures particulières neuves (règlement n° 443/2009).

Pour 2020, deux des objectifs sont contraignants : la part d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale et les objectifs d'émission de gaz à effet de serre différenciés selon les États-membres par rapport à 2005.

Contrairement à l'image parfois perçue, ce plan ne concerne pas uniquement la production d'électricité. Dans nos pays européens la consommation énergétique est dédiée pour près de 50 % au chauffage, eau chaude, air conditionné et pour 30 % à la mobilité, principalement le transport routier. La part de l'électricité est donc faible dans ce total, même en France où l'électricité a été fortement développée dès les années 1950 dans un souci d'indépendance énergétique (production hydraulique, puis nucléaire et donc sans charbon).

Le paquet climat-énergie met en œuvre des dispositions contraignantes concernant deux des trois objectifs que s'est assignée l'Union européenne pour 2020 lors du conseil européen de mars 2007 :

- la directive « Énergies renouvelables » 2009/28/CE fixe les objectifs de chaque pays concernant la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale. Elle prévoit également que le secteur des transports, dans chaque État, utilise au moins 10 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables ;
- la décision 406/2009/CE fixe les objectifs de limitation des émissions de gaz à effet de serre dans chaque État par rapport à 2005. Ces objectifs sont négatifs dans certains pays (baisse des émissions) et positifs dans d'autres (hausse limitée des émissions, dans les États pour lesquels une croissance économique importante est prévue afin de rattraper les pays les plus avancés de l'Union).

Le paquet climat-énergie intègre le mécanisme d'échange de quotas d'émission déjà évoqué. Le paquet 20-20-20 est donc appliqué par les États-membres qui font l'hypothèse que le marché de l'énergie sera totalement libéralisé et que chaque

État-membre sera libre dans la détermination de son bouquet énergétique et de ses sources d'approvisionnement.

Il est donc compréhensible, par exemple, que très rapidement après la catastrophe de Fukushima la chancelière allemande prenne la décision de faire sortir l'Allemagne de la production d'électricité nucléaire et que les États-membres soient avertis par la presse. Il en est de même pour toutes les politiques de subventions ou d'avantages fiscaux pour l'installation de systèmes de production d'énergie renouvelable (solaire, éolien, méthanisation, bois énergie, etc.) ou de développement de modes de transport ne consommant pas ou moins de combustibles fossiles. Chaque État-membre est libre de ses choix, alors que l'Europe et le marché de l'énergie fonctionnent comme un système où tout interagit avec tout.

Le marché de l'électricité commun à tous les États-membres ne permet pas, en principe, des accords de moyen ou long terme qui garantissent une mise à disposition planifiée à l'avance et l'assurance de l'achat des quantités d'électricité correspondantes. Par ailleurs, le prix de l'électricité est fixé en fonction du coût marginal de production. Par définition, dans ce marché européen, les énergies intermittentes (solaire photovoltaïque, éolien) sont considérées comme ayant un coût marginal nul puisqu'elles sont perdues si elles ne sont pas consommées au moment où elles sont produites. L'énergie hydroélectrique au fil de l'eau (les usines placées sur le Rhin et le Rhône par exemple) n'ont pas un coût marginal nul puisqu'une gestion fine des volumes d'eau dans les biefs permet un décalage de plusieurs heures entre la production et la consommation, et donc une valeur à terme. Il en est de même pour le solaire thermodynamique, assez développé en Espagne, qui permet, grâce aux techniques des sels fondus, de décaler la production maximale vers le soir, au moment où la demande est forte, alors que, sans le stockage dans les sels fondus, le maximum de production se situerait en milieu de journée.

Pourtant, pour le consommateur en 2014, le coût marginal des kWh qu'il achète n'est pas nul, car c'est le consommateur d'électricité qui paie directement, sur sa facture d'électricité, le coût des subventions et le coût des contraintes de réseau provoquées par les énergies intermittentes. Paradoxalement, ce sont les énergies, certes pleines d'avenir, mais pour l'instant les plus perturbatrices pour les réseaux, qui sont largement favorisées, à un coût important : par exemple, l'Allemagne qui dispose en 2014 de 38 GW de solaire photovoltaïque et de 39 GW d'éolien distribue 24 milliards € par an de subventions à ces énergies, la France qui dispose de 5 GW de solaire photovoltaïque et un peu plus de 8 GW d'éolien distribue 3,5 milliards € de subventions.

Ces coûts du développement des énergies renouvelables intermittentes n'incluent pas les coûts d'investissement des développements collatéraux qu'ils appellent. Par exemple, des interconnexions entre les zones de forte production éolienne, au sud de l'Espagne ou au nord de l'Allemagne, et des zones de forte consommation, sont nécessaires à l'exploitation profitable de l'énergie éolienne. Le développement de capacités de stockage massif est indispensable pour valoriser efficacement le solaire photovoltaïque.

Du point de vue climatique, le développement intensif des énergies renouvelables intermittentes n'a pas eu, pour l'instant, d'impact sensible sur les émissions de gaz à

effet de serre en Europe. Si l'on souhaitait calculer et présenter le prix de la tonne de gaz à effet de serre évité grâce aux énergies renouvelables intermittentes, on arriverait à un prix de plusieurs centaines d'euros, alors que le prix de marché du carbone (selon le marché EU ETS) varie entre 5 et 7 € la tonne. En France, le développement des ENR intermittentes se traduit par de très faibles économies d'émissions puisque l'électricité remplacée était générée majoritairement par de l'énergie nucléaire et hydroélectrique. En Allemagne, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté malgré un développement considérable du solaire photovoltaïque (38 GW) et de l'énergie éolienne (39 GW) à comparer aux 64 GW de puissance installée en énergie nucléaire en France, et ceci avant que la sortie du nucléaire de l'Allemagne ne soit effective.

Cette sortie s'est traduite par de nouveaux investissements en centrales thermiques charbon et lignite qui, mécaniquement, vont augmenter les émissions. L'arrêt de la production d'électricité avec des turbines à gaz à très haut rendement est dû au prix relatif du gaz et du charbon en Europe. Il est aujourd'hui beaucoup plus rentable de produire de l'électricité avec du charbon qu'avec du gaz dans la conjoncture de prix en Europe et ceci, depuis plusieurs années déjà. C'est le contraire aux États-Unis. Le développement de la production d'électricité au charbon et au lignite plutôt qu'au gaz a beaucoup plus d'impact sur les émissions de gaz à effet de serre que le développement de la production d'électricité intermittente.

C'est en partie pour cette raison que de nouveaux documents européens ont été émis.

2030

Un *green paper* a été émis le 27 mars 2013 : « *A 2030 framework for climate and energy policy*⁵ ». Il n'a pas été adopté formellement. Il introduisait des réflexions fort pertinentes sur l'économie des projets :

- les investissements actuels seront en service en 2030 et au-delà. Les investisseurs ont besoin d'un avenir certain dans le domaine réglementaire et régulateur ;
- l'Europe a besoin de développer sa compétitivité pour créer des emplois et de la croissance ;
- l'Europe doit préparer la COP21 au niveau communautaire.

Il proposait de concentrer vraiment les efforts sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

En 2014, la Commission européenne a adopté une nouvelle série d'orientations. Certaines sont contraignantes, comme les objectifs d'émission de gaz à effet de serre, d'autres ne le sont pas, comme la part d'énergie renouvelable ou l'objectif d'efficacité.

5. http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned_ia/docs/2013_clima_007_energy_climate_framework_en.pdf

Le texte de 2014 insiste aussi sur la sécurisation de l'approvisionnement énergétique de l'Europe. C'est le contrecoup des menaces russes sur l'approvisionnement en gaz de l'Europe.

Le paquet climat-énergie de 2014 fixe de nouveaux objectifs pour 2030 :

- 40 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990 (seul objectif contraignant) ;
- 27 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique ;
- 27 % d'économies d'énergie (ce qui n'est pas synonyme d'efficacité énergétique, paradigme utilisé jusqu'alors).

Pour les réflexions à venir sur les énergies renouvelables, et notamment pour la COP21, il serait intéressant de mieux distinguer les énergies intermittentes qu'il faut consommer quand elles sont produites (sinon, elles sont perdues) et les énergies disponibles en fonction de la demande. Cette distinction a un fort impact sur l'économie globale du secteur électrique européen.

Les énergies photovoltaïques et éoliennes sont des énergies « fatales ». Leur valeur est nulle lorsque la production est supérieure à la demande. Cette valeur augmente si la demande coïncide avec la période de production. Par exemple, en été, là où la consommation d'électricité est en partie destinée à l'air conditionné, la production photovoltaïque est sensiblement corrélée à l'intensité du soleil et la valeur des kWh produits est optimale. Mais, si la demande d'électricité est essentiellement nocturne, la production doit être décalée. Or les décalages dans le temps sont coûteux et, aujourd'hui, hors d'atteinte pour des décalages longs. La part potentielle de renouvelables intermittents dans l'ensemble de la production électrique dépend largement du régime des vents ou de l'ensoleillement de la région concernée. Dans les vents alizés ou à Gibraltar il n'y a pratiquement pas de périodes sans vent et il existe un rythme thermique diurne des vents, ce qui est favorable à une intégration de l'éolien marocain dans le système de production. Ce n'est pas le cas de l'Europe où le vent présente d'assez longues lacunes, y compris en hiver.

Le solaire thermodynamique et l'hydraulique au fil de l'eau permettent un décalage de 5 à 7 heures entre la période de production et la mise à disposition sur le réseau en fonction de la demande, ce qui autorise un certain ajustement, notamment entre jour et nuit. Ce sont des énergies renouvelables modulables (on dit parfois *dispatchable*) et non plus intermittentes.

Les énergies renouvelables stockables sont l'hydro-électricité (l'électricité d'un pays ou d'une région peut être à quasiment 100 % hydraulique, comme en Norvège ou au Canada et au Cameroun) et les énergies issues de la biomasse solide liquide ou gazeuse.

Le développement très rapide du photovoltaïque et de l'éolien, notamment en Allemagne et en Espagne, justifie *a posteriori* (c'était pourtant prévisible) une demande urgente de réseaux électriques pour augmenter le foisonnement de l'offre (en espérant que les vents sont fortement contrastés selon les régions, et donc qu'il y a toujours un peu de vent quelque part en Europe) et de stockage d'électricité (par exemple par des stations de pompage-turbine hydrauliques adossées

à des barrages — STEP⁶) pour permettre les décalages et combler les lacunes de production.

Aujourd'hui, la plupart des systèmes de stockage ont une durée de stockage à pleine puissance égale de 5 à 7 heures, notamment les STEP hydrauliques françaises (système avec deux retenues, une basse et une haute reliées par des tunnels et des puits en charge et d'une usine capable de pomper ou de turbiner l'eau selon les opportunités et les nécessités) qui ont une capacité de puissance totale de 5 GW seulement. Seules deux STEP en France atteignent 20 heures de stockage à pleine puissance (1,7 GW). Il existe de nombreux moyens de stockage de l'électricité (STEP, batteries, volants d'inertie, air comprimé...) tous de relativement courte durée. Les transferts de plusieurs jours, plusieurs semaines ou intersaisonniers, dans l'état actuel des technologies, passent par la production d'hydrogène et de méthane (*Power to Gas*) qu'il faut ensuite stocker en très grande quantité, au-delà des stockages disponibles. Puis il faut produire de l'électricité avec le gaz, par combustion ou pile à combustible. Le modèle économique reste à trouver. Il est probablement plus prometteur de stocker de la chaleur que de l'électricité, si l'usage final est de produire de la chaleur.

Il existe deux arguments techniques et économiques spécifiques associés à des modèles économiques crédibles pour le stockage de l'électricité pour quelques heures : les véhicules électriques associés aux énergies intermittentes. Tesla essaie de grouper les deux sujets pour donner une deuxième vie à ses batteries automobiles en profitant d'un système de marché de l'électricité californien qui rémunère le stockage ou la production garantie d'électricité afin d'éviter les variations rapides des énergies renouvelables intermittentes. Le système européen ne rémunère ni l'un ni l'autre. Les modèles économiques possibles dépendent des règles du marché et de la réglementation.

Pour l'instant, le développement des énergies renouvelables intermittentes ou des bioénergies n'a pas diminué les émissions de CO₂ en Allemagne, en Espagne et en France. Or il faudra parvenir, lentement mais sûrement, à réduire substantiellement les émissions de GES, puis à remplacer totalement les énergies fossiles par des énergies renouvelables, ce qui suppose des efforts continus en R&D, et des innovations dans le domaine réglementaire et commercial pour permettre le développement d'innovations technologiques qui doivent accroître la flexibilité du système électrique et la gestion optimale de la demande.

Le texte de 2014 remplace le terme « efficacité énergétique » par le terme « économie d'énergie ». Il aurait été préférable de maintenir le concept d'efficacité énergétique car cette notion d'efficacité est beaucoup plus féconde et plus structurante que la simple notion d'économie d'énergie. En effet, l'amélioration de l'efficacité énergétique est de deux ordres :

- améliorer l'efficacité énergétique à l'intérieur d'un paradigme existant : les centrales à charbon à très haut rendement, le drainage du méthane dans les mines

6. Station de transfert d'énergie par pompage.

de charbon, les moteurs thermiques à basse consommation, les habitats bien isolés, etc. ;

- changer de paradigme en modifiant les pratiques (usage des appareils électriques encouragés à certaines périodes, usage plus collectif des voitures pour augmenter le taux moyen de remplissage, amélioration pour limiter les transports en voiture individuelle etc.).

C'est à une amélioration systémique globale de l'efficacité énergétique qu'il faut s'attaquer. L'analyse du passé montre que c'est ainsi que les grands changements s'opèrent.

Où en est l'Europe ?

D'une façon générale, les émissions de l'Union européenne décroissent depuis 1990 choisie comme année de référence. Elles ont diminué d'environ 2,5 % en 2015 par rapport à 2014 avec de forts contrastes selon les États membres. Les plus fortes réductions ont été enregistrées à Chypre (– 14,7 %), en Roumanie (– 14,6 %), en Espagne (– 12,6 %) et en Slovaquie (– 12 %). En revanche, elles ont augmenté au Danemark (+ 6,8 %), en Estonie (+ 4,4 %), au Portugal (+ 3,6 %) et en Allemagne (+ 2 %). La quantité de gaz à effet de serre émise annuellement par habitant permet une comparaison équitable entre les pays. Les émissions par habitant sont égales à 12,2 tonnes de CO₂ en République Tchèque, 11,3 tonnes de CO₂ en Allemagne, 10 tonnes en Pologne, 9 tonnes au Royaume-Uni, environ 7 tonnes en Espagne, en Italie et en France.

D'une certaine façon, les émissions sont un marqueur de l'activité économique et des modes de production actuels. La réunification allemande a eu lieu entre octobre 1989 et octobre 1990. À partir de cette date, l'est de l'Allemagne a muté progressivement d'un système énergétique « soviétique » à un système occidental. Des usines ont été fermées, d'autres construites. La forte baisse des émissions de gaz à effet de serre a eu lieu entre 1990 et 1998. Or il se trouve que 1990 est la date de référence pour le protocole de Kyoto.

Les « bons élèves » sont les pays situés à l'est de l'Europe (ils ont accompli de grands progrès d'efficacité énergétique, au sortir de l'ère soviétique, avec le support de l'Europe) et les pays en crise grave comme la Grèce. La Norvège apparaît comme un assez mauvais élève, ce qui est paradoxal puisque son électricité est produite à 98 % par l'hydroélectricité, ce qui lui permet de vendre de l'électricité flexible pour adosser les productions d'électricité intermittentes du Danemark et du nord de l'Allemagne grâce à la souplesse et au stock de sa capacité hydroélectrique.

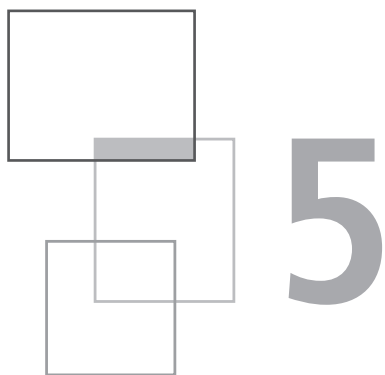
En revanche, on peut remarquer que la Norvège est un grand exportateur de gaz. Actuellement, on ne reproche rien à ceux qui extraient le charbon, le gaz et le pétrole et qui le vendent, mais plutôt à ceux qui les brûlent. La Norvège qui produit son électricité grâce à l'hydroélectricité et qui, globalement, émet peu de gaz à effet de serre, peut paraître exemplaire... Pourtant sa richesse vient du gaz qu'elle extrait

de son territoire et qu'elle exporte. Tout combustible extrait est voué à être brûlé, à l'exclusion de la petite quantité utilisée pour la chimie. C'est aussi de l'extraction qu'il faudrait parler.

L'autre baisse des émissions de GES constatée dans beaucoup de pays est associée à la crise économique de 2008 qui a diminué l'activité économique.

Le système économique, les modes de vie, les habitudes de consommation et l'activité industrielle ont un impact déterminant sur les émissions de gaz à effet de serre. Tous ces paramètres ont une influence sur l'efficacité énergétique. Le fait de remplacer une centrale électrique au charbon vieille et à faible rendement (32 % par exemple) par une centrale moderne à haut rendement (plus de 45 %) a un effet immédiat sur les émissions de gaz à effet de serre simplement parce qu'avec la même quantité de charbon (donc pour la même quantité de gaz à effet de serre émis) la quantité d'électricité produite est plus importante. De plus, la rentabilité économique est immédiate. Ce n'est pas satisfaisant à long terme, mais il faut s'occuper de la période de transition car elle sera longue.

C'est probablement dans l'efficacité énergétique au sens large que se situent les gisements les plus rapidement mobilisables d'émission de gaz à effet de serre et donc de lutte contre le réchauffement climatique. En revanche, pour l'instant, l'impact du développement des énergies renouvelables intermittentes est peu perceptible malgré son coût. Il reste beaucoup de travail de recherche, d'industrialisation et de développement de systèmes d'achat pour préparer un avenir encore lointain qui soit réellement sans carburant fossile.



Donner un prix au carbone

Donner un prix au carbone est nécessaire pour mettre en place une politique climatique. En principe économique, le coût du carbone pour celui qui l'émet devrait être égal au coût du dommage marginal entraîné par le gaz à effet de serre émis une fois qu'il a été transformé en équivalent carbone. Il n'est pas possible de déterminer sans ambiguïté le dommage économique de l'émission d'une tonne de CO₂ équivalent. Ce signal prix permet aux industriels de faire des choix opérationnels ou d'investissements, de manière à faire la balance entre le coût futur de l'émission de gaz à effet de serre et le coût de continuation avec les mêmes pratiques. En Europe, le système EU ETS concerne essentiellement le secteur énergétique ; donc la quantité de gaz à effet de serre est en grande partie le résultat d'un simple calcul. Par exemple, brûler une tonne de charbon émet 1,3 fois plus de GES que brûler une tonne de pétrole et 1,7 fois plus que brûler une tonne de gaz. Cela dépend de la formule chimique du combustible. Le rendement des machines, en s'améliorant, permet de produire plus de kWh pour la même quantité de combustible, donc pour la même quantité de GES émise. Une centrale à charbon très performante peut produire de l'énergie en émettant moins de GES qu'une très vieille centrale au fuel lourd.

Le signal prix touche des investissements lourds et de longue haleine. Dans les conditions économiques de 2014, les industriels estiment qu'un prix de CO₂ de 25 €/tonne met en équivalence la production d'électricité au gaz et au charbon. Actuellement, la plupart des grandes centrales à gaz européennes sont sous cocon car leur exploitation n'est pas rentable bien qu'elles soient à très haut rendement. Un prix d'environ 50 €/tonne de CO₂ met en équivalence le lancement d'une nouvelle centrale au gaz et au charbon, en terme global d'investissement et d'exploitation. Le chiffre de 35 €/tonne de CO₂ est souvent utilisé comme chiffre d'équivalence charbon-gaz en Europe. Si les prix du charbon et du gaz varient, ces chiffres varient

aussi. En Asie où le gaz est plus cher et le charbon plus proche (extrait dans la région, notamment en Chine, en Australie et en Indonésie), le prix du carbone nécessaire à favoriser l'investissement en turbines à gaz à cycle combiné serait nettement plus élevé et les centrales à charbon se développent rapidement et dureront plus de 50 ans.

Le principe des attributions gratuites ou des mises aux enchères de permis d'émission est une façon de laisser le marché opérer les ajustements nécessaires. C'est l'objectif de l'EU ETS. Notons que la mise en place d'une taxe carbone, c'est-à-dire d'une fiscalisation du carbone pose un problème au niveau européen, puisqu'une aggravation de la fiscalité ne peut être votée qu'à l'unanimité des États-membres, ce qui n'est ni simple, ni rapide. La communauté européenne n'a donc pas d'autre solution globale à proposer à l'EU ETS. Elle doit le rendre efficace.

L'EU ETS a été développé en 2005 et ne concerne que les secteurs de l'énergie électrique, l'industrie électro-intensive et l'aviation commerciale, responsable de 45 % des émissions des territoires européens. Le système EU ETS est le premier grand système d'échange de permis d'émissions. Jusqu'en 2008, le système était en phase pilote, les limites d'émissions étaient stables et les permis attribués gratuitement. À partir de 2013, les permis ont fait l'objet d'enchères à hauteur de 40 % et il était supposé que les émissions baissent linéairement avec un coefficient (*Linear Reduction Factor*) de 1,74 % par an, ce qui conduit mathématiquement les émissions des secteurs concernés à diminuer de 21 % entre 2005 et 2020. En volume, ceci correspond à une réduction de 2,5 Mt de CO₂ en 2005 à 1,9 Mt de CO₂ en 2020, soit une réduction de permis de 38 Mt/an. Si ce coefficient est maintenu jusqu'en 2050, la réduction des secteurs concernés sera de 71 %.

Quelle est l'efficacité du système EU ETS ?

D'après les études faites, les émissions ont été réduites d'environ 3 % durant la phase I et le début de la phase II, c'est-à-dire lorsque le prix du CO₂ était voisin de 20 € la tonne (30 €/tonne à mi-2008). Entre 2009 et 2013, les émissions étaient inférieures aux plafonds imposés, qui n'étaient plus contraignants. Les objectifs étaient atteints, mais principalement du fait de la crise économique et non à cause des investissements nouveaux permettant de diminuer les émissions à activité constante. L'impact du prix du carbone était peu perceptible et il y avait un fort excès de permis. Les émissions d'EU ETS ont été réduites en 2012 et 2013. Cependant, le prix très bas, inférieur à 5 € (3 €/tonne en avril 2013), n'avait aucun impact sur les décisions des opérateurs industriels. En 2014, le volume d'enchères de 900 millions de permis a été retardé de 2013-2015 à 2019-2020. En 2014, le volume a été réduit de 400 millions, en 2015 de 300 millions et de 200 millions en 2016. Le plafond global pour la phase III ne change pas.

La principale explication de ce prix très bas est donc la crise économique, mais c'est aussi le système de subventions aux énergies renouvelables qui n'est pas lié à la tonne

de CO₂ évitée et qui donne donc des signaux prix variables selon les pays et désordonnés en termes d'émission de CO₂. On pourrait supposer que ce prix très bas auraient poussé les industriels à se couvrir en vue d'une augmentation vraisemblable des prix du carbone sous l'influence des accords internationaux, et notamment des accords contraignants que les acteurs pouvaient penser devoir de la COP21. Il n'en a rien été. Le marché n'a pas l'hypothèse d'une hausse prochaine. Il est possible que le système de crédit Kyoto ait perturbé le système en 2011 et 2012, quand la Commission européenne a décidé d'exclure les crédits issus des hydrofluorocarbones et de l'oxyde nitrique N₂O qui avaient fait l'objet d'abus. Il semble que l'explication la plus solide du prix bas est le manque de confiance, de certitude ou de crédibilité de la politique Climat en Europe et dans le monde. En janvier 2014, la Commission européenne propose une réforme : *« Un surplus élevé rend très confus le signal pour les investissements qui sont nécessaires à la transition vers une économie dite bas carbone. C'est un problème car le système devrait verrouiller les investissements en charbon, en particulier si l'on considère le ratio de prix entre le charbon et le gaz »*. De gros investissements en charbon sont aujourd'hui rationnels économiquement en Europe et dans le monde : ils ne vont pas dans le sens que souhaite l'Europe. Si le marché du CO₂ fonctionnait selon les vœux de la Commission, son prix devrait s'établir à un niveau qui arrête le développement du charbon.

Il est nécessaire d'éviter des interactions entre le système de prix du carbone géré par le marché EU ETS et les politiques nationales qui peuvent avoir d'autres vues, d'autres ambitions et d'autres stratégies industrielles en fonction de marchés futurs espérés. Chaque État-membre est souverain pour choisir son mix énergétique et ses systèmes de subventions et de taxes.

Jusqu'à présent, la Commission européenne a envisagé des réformes partielles en jouant essentiellement sur les quantités de permis, sans chercher à influencer sur le signal prix. La plate-forme *Energy* de Euro-CASE (*European Council of Applied Sciences Technologies and Engineering*) propose une réforme significative incluant un couloir de prix qui donne un signal ferme aux acteurs industriels. Le rapport propose également d'élargir le système EU ETS à d'autres secteurs majeurs, comme le transport (hors aérien) et le chauffage, et de traiter les problèmes de fuite de carbone (le contenu carbone des produits importés) en élargissant le groupe de pays participants au système EU ETS. Ce devrait être l'un des résultats de la COP21. Cependant, il est judicieux, si l'on veut parvenir à des accords, de laisser à chaque pays le choix des instruments économiques qu'il s'engage à utiliser.

Phase 3 : 2013-2020

La phase 3 est un renforcement du système dans l'optique d'obtenir une réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre en 2020 (par rapport à 1990). Ainsi, à partir de 2013 :

- l'application du système est élargie ;

- les plafonds d'émission nationaux sont remplacés par un plafond unique européen ;
- le quota est réduit linéairement chaque année ;
- les quotas deviennent progressivement payants (la mise en œuvre se fera secteur par secteur, le secteur électrique étant le premier à passer à une allocation 100 % aux enchères avec certaines exceptions) ;
- etc.

Le 16 avril 2013, le Parlement européen refuse néanmoins, par un vote, de retirer 900 millions de tonnes de droits d'émission du marché du carbone. L'objectif de cette proposition était de faire remonter le cours de la tonne de CO₂, descendue en dessous de 4 € sous l'effet de la crise.

Le Parlement européen s'est prononcé, le 24 février 2015, pour la création d'une « *réserve de stabilité de marché* » pour fin décembre 2018, soit trois ans plus tôt que ce qui était proposé par la Commission. Ce nouveau mécanisme permettrait de réguler le marché en retirant des quotas d'émission de CO₂ en période de récession et, à l'inverse, en en redistribuant en période de croissance. La France, la Grande-Bretagne et l'Allemagne souhaitent que la réserve soit mise en place dès 2017, mais plusieurs pays est-européens, menés par la Pologne, sont réticents et préconisent d'attendre 2021.

La Commission européenne propose en juillet 2015, dans un « paquet d'été » sur l'énergie, une réforme du marché du carbone pour l'après-2020, qui durcit sensiblement les conditions d'octroi des quotas d'émission, en vue de transcrire dans des actes juridiques l'objectif que s'est fixé l'Union européenne de réduire ses émissions d'au moins 40 % d'ici à 2030. Elle propose notamment de réduire de 21 % la quantité globale de quotas de CO₂ (droits à émission) alloués entre 2021 et 2030, par rapport à la période 2013-2020, soit -2,2 % par an. Une partie croissante de ces quotas (57 %) sera dès aujourd'hui soumise à un système d'enchères et seulement 43 % seront attribués gratuitement. Les allocations gratuites seront réservées aux secteurs qui présentent le plus grand risque de délocalisation de leurs activités de production en dehors de l'Union européenne. Le nombre d'industries éligibles à 100 % de quotas gratuits sera réduit de 180 à 50. L'acier, l'aluminium et la chimie en feront partie. Un fonds pour l'innovation sera alimenté par le produit des enchères de 400 millions de quotas (estimé à environ 10 milliards €) et destiné à soutenir l'investissement dans les énergies vertes ou la séquestration du carbone. Cette réforme, plus la réserve de stabilité adoptée quelques jours auparavant par le Parlement européen, pour mise en œuvre à compter de 2019, devraient faire remonter le prix du carbone : l'agence de presse Thomson Reuters prévoit 17 € en 2020 et 30 € en 2030, alors que la tonne de CO₂ évolue aujourd'hui entre 5 et 10 €, niveau jugé insuffisant pour orienter les investissements vers des industries moins émissives.

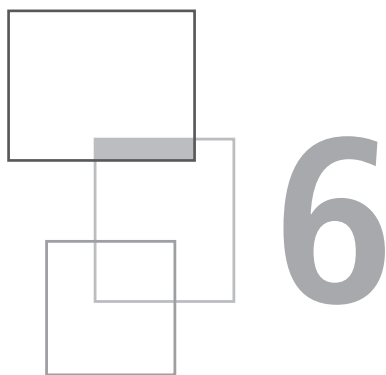
Le registre européen des quotas d'émission de gaz à effet de serre peut être assimilé à un compte bancaire en ligne. Cette application en ligne enregistre :

- le montant de quotas d'émissions détenus par le titulaire du compte ;

- les mouvements de quotas entre les différents comptes (opérations d'allocation, de transfert, d'annulation, etc.) ;
- les émissions annuelles réelles constatées/vérifiées pour les installations et les compagnies aériennes ;
- le statut de conformité pour les installations et les compagnies aériennes.

Le registre des transactions de l'Union européenne (EUTL) contrôle, enregistre et autorise toutes les transactions qui ont lieu entre les comptes du registre. Cet EUTL peut être consulté en ligne. On y trouve également une information précise concernant les rapports de conformité de tous les opérateurs participant à l'ETS, les comptes de ces opérateurs et l'historique de toutes les transactions.

Les chapitres 6 à 9 analysent en détail des sujets qui ne nous semblent pas traités avec suffisamment de recul et de soin, ni par le GIEC, ni par les COP. La question de l'évolution des ressources en eau est considérée par la plupart des pays comme centrale dans leur stratégie et leur politique de développement. C'est un sujet qu'il faut considérer comme majeur, au moins au même niveau que la température. Le méthane joue un rôle très particulier, bien différent du rôle joué par le dioxyde de carbone. Le méthane d'origine naturelle et le méthane d'origine anthropique interfèrent fortement entre eux, avec des interactions fortes et des rétroactions. Il est essentiel que la COP considère le méthane comme un sujet en soi et non comme un sous chapitre du dioxyde de carbone, et pour cela, il faut entrer dans la complexité des sources et des puits de méthane. Ils sont complexes par leur fonctionnement physicochimique, mais aussi parce qu'ils impliquent les modes de fonctionnement de nombreuses populations de la planète et de nombreuses professions. Enfin la géo-ingénierie climatique est un domaine de la science et de la technologie qui doit être développé afin d'en tirer le meilleur parti, mais aussi de d'éviter les fausses pistes.



Des ressources hydriques difficiles à anticiper

L'eau est omniprésente à la surface de la planète, eau douce et eau salée, eau continentale de surface et souterraine, eau des mers et des océans, sous forme liquide, de neige ou de glace. Elle est indispensable à la vie. Elle est aussi employée à diverses fins, par exemple pour la production d'énergie ou comme support pour des moyens de transport (fluviaux ou maritimes). Par ailleurs, la dynamique climatique est liée à celle des grandes masses océaniques et à la répartition atmosphérique de la vapeur d'eau. Réciproquement, son cycle est modifié par l'évolution du climat. De ce fait, divers usages en dépendent (agriculture, énergie, eau potable et domestique, besoins des écosystèmes). Elle peut aussi être un facteur de risque (inondations, pluies intenses, coulées torrentielles, sécheresses). Elle permet la diffusion et le transport d'éléments minéraux ou organiques. Enfin, la lecture « au fil de l'eau » est un bon moyen de suivi, de compréhension des activités humaines et de leurs effets sur l'environnement.

Les impacts attendus du réchauffement climatique sur les différentes formes d'eau sont divers et importants. Certains commencent à être bien documentés, d'autres font l'objet de recherches et d'approfondissements afin de les établir solidement, de raffiner les modèles prévisionnels et d'orienter les politiques publiques. Parmi les principaux effets observés ou attendus on peut citer :

- des variations dans les précipitations, y compris neigeuses, en fréquence, en intensité et en moyenne, et des variations dans les débits des fleuves en moyenne ou en amplitude de variation. Les modèles proposent des scénarios qui peuvent avoir des conséquences positives ou négatives selon les lieux et les types

d'activités. Les scénarios pour la France métropolitaine ont été analysés dans un document récent : *Climat de la France au XXI^e siècle*, ONERC, G. Ouzeau, M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard (du ministère de l'écologie et du développement durable sous la direction de Jean Jouzel). La France est située dans une zone climatique intermédiaire où les incertitudes sont les plus fortes, ce qui rend l'approche très complexe ;

- les glaciers continentaux qui sont des réserves d'eau douce dont la fonte de printemps et d'été participe au débit des rivières.

Une partie des précipitations d'eau ruisselle ou s'infiltre jusqu'aux nappes souterraines : c'est l'eau bleue, qui peut être prélevée par pompage et utilisée par l'homme. Une partie s'infiltre dans le sol superficiel (1 à quelques mètres) puis est reprise soit par évaporation directe depuis la surface, soit par les racines et évapotranspirée par la végétation : c'est l'eau verte, capitale pour le monde végétal. Dans le monde, 6 300 km³/an d'eau verte sont utilisés annuellement pour l'agriculture pluviale (eau verte) et 1 800 km³/an pour l'irrigation (eau bleue) sans compter les pertes d'eau d'irrigation (environ 700 km³/an). En France, 86 % de l'eau des précipitations utilisée (eau bleue et verte) sert à l'agriculture. La consommation d'eau bleue est à 48 % pour l'irrigation. Dans le monde, l'utilisation d'eau bleue se répartit entre 70 % pour l'irrigation, 22 % pour l'industrie et 8 % pour la consommation domestique. Cette importance relative de l'irrigation est très variable en fonction du climat et de la stratégie des pays. Par exemple, au Maroc, 48 % des prélèvements d'eau bleue sont destinés à l'irrigation, en Tunisie 80 %, en Algérie moins de 60 %. On estime aujourd'hui que dans certains pays, l'irrigation se fait en extrayant des aquifères des volumes d'eau supérieurs à la recharge annuelle moyenne, ce qui conduit à vider ces aquifères d'une fraction plus ou moins grande de leurs stocks, ce qui ne peut pas durer indéfiniment. Dans l'ordre décroissant d'importance, les pays concernés sont l'Inde (35 km³/an), le Pakistan (18 km³/an), les USA (16 km³/an), l'Iran (14 km³/an), la Chine (11 km³/an), le Mexique (6 km³/an). Ces chiffres proviennent, pour partie, de modélisations hydrologiques et, pour une autre, de mesures du champ de gravité réalisées depuis l'espace par le satellite US GRACE. Le total mondial de ces prélèvements sur les stocks d'eau douce serait de l'ordre de 125 km³/an, soit environ 5 % de toute l'eau utilisée dans le monde pour l'irrigation (2 510 km³/an en 2000). Mais ces estimations sont très imprécises. Dans le monde, plus de 70 % des barrages ont l'irrigation comme vocation première (l'énergie hydroélectrique est la vocation principale de moins de 25 % des barrages). La consommation d'eau pour l'énergie est faible, même si les prélèvements sont importants. En effet, l'eau prélevée est immédiatement rejetée dans le milieu. La génération d'électricité thermique requiert une source chaude et une source froide obtenue par circulation de l'eau d'un fleuve, de la mer ou en évaporant de l'eau dans des tours. Par exemple, sur le Rhône, les centrales nucléaires de Bugey et Cruas (à tours de refroidissement), plus Saint-Alban, Tricastin (sans tour de refroidissement) consomment 4,5 m³/s en moyenne alors que le débit d'étiage est de l'ordre de 600 m³/s à Beaucaire. Dans certains cas, l'énergie peut entrer en compétition avec l'irrigation en saison sèche. Pour cette raison, beaucoup d'usines thermiques sont construites en bord de mer. L'énergie hydroélectrique ne

consomme presque pas d'eau. Dans certains cas, les lacs de retenue évaporent plus que l'espace végétal qu'ils remplacent, surtout dans les pays désertiques, ce qui fait baisser localement la température. Cette évaporation correspond à une consommation d'eau faible. Pour le barrage d'Assouan, construit en Égypte en plein désert, on l'estime quand même à 12 % de la ressource, soit environ 10 km³/an. La production hydroélectrique dépend du débit des rivières, de la hauteur de chute et du volume de stockage. En ce sens elle est directement impactée par la modification des débits des rivières.

La production agricole est sensible aux modifications saisonnières et interannuelles des ressources en eau et à leur évolution tendancielle, davantage pour l'agriculture pluviale que pour l'agriculture irriguée. Ces variations ont un impact sur la productivité et sur les types de culture ou d'élevage développés.

Les ressources en eau sont soumises à de fortes variations dans le temps, avec des sortes d'alternances pluriannuelles de périodes sèches ou humides, variables selon les types de climat et donc selon les régions. Il est donc essentiel de tenter d'anticiper les tendances des variations des ressources en eau associées au changement climatique et difficilement discernables au sein de la grande variation naturelle des pluies et des chutes de neige.

Ce que dit le *Giec*

Un document de synthèse a été émis par le *Giec* en juin 2008, « Le changement climatique et l'eau », document technique VI du *Giec*. Les auteurs soulignent que l'attribution des causes des changements des précipitations mondiales n'est pas claire du fait que ces dernières sont fortement influencées par l'amplitude de la variabilité naturelle. Le sujet de l'évapotranspiration est abordé : « *Il n'existe que peu de littérature sur les tendances observées en matière d'évapotranspiration réelle ou potentielle* ». [...] « *Un résultat extrêmement fiable est que le réchauffement climatique donnerait lieu à des variations saisonnières de l'écoulement fluvial là où une grande partie des précipitations hivernales tombent actuellement sous forme de neige, avec des débits printaniers inférieurs en raison de la baisse ou de la précocité de la fonte de neige, et des débits hivernaux supérieurs. C'est notamment le cas dans les Alpes européennes, en Scandinavie et autour de la mer Baltique, en Russie, dans la chaîne de l'Himalaya ainsi que dans l'ouest, le centre et l'est de l'Amérique du Nord* ». Le rapport ne propose pas de conclusion sur la quantité de neige et les tendances perçues. En 2015, la quantité de neige a été très exceptionnellement élevée en Norvège. Le phénomène *El Niño* joue un rôle essentiel dans les oscillations climatiques à l'échelle pluriannuelle. « *Les observations disponibles jusqu'à présent ne font pas état d'un changement formellement détectable de la variabilité du phénomène ENSO (El Niño – Southern Oscillation, El Niño — oscillation australe)* ». La figure 6.1 qui suit montre les courbes d'anomalies qui caractérisent *El Niño* depuis 1950.

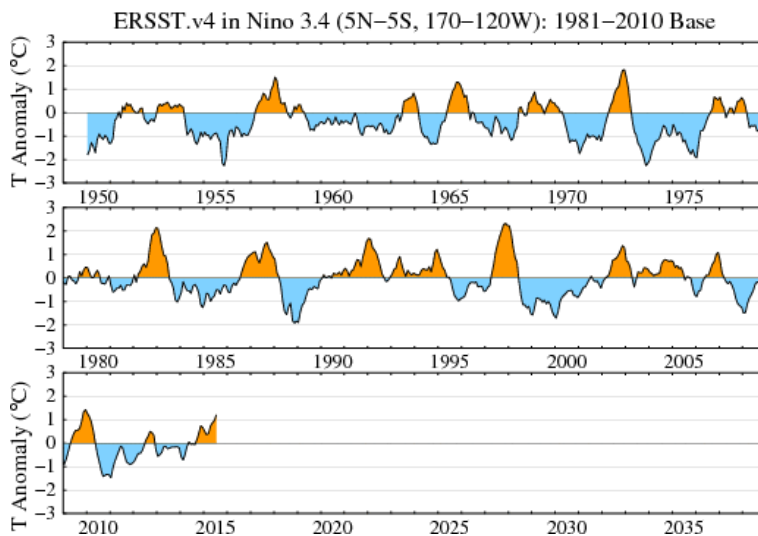


Figure 6.1 Courbes d'anomalie des températures qui caractérisent El Niño depuis 1950.

Dans le rapport du GIEC, il est dit qu'aucune corrélation solide n'est décelée entre température et ressources hydriques. Le résumé exécutif est plus conclusif :

« Le réchauffement observé pendant plusieurs décennies a été relié aux changements survenus dans le cycle hydrologique à grande échelle, notamment : l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, la modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaces accrue, ainsi que la modification de l'humidité du sol et du ruissellement. Les changements dans les précipitations sont très variables à l'échelle spatiale et d'une décennie à l'autre. Au cours du XX^e siècle, les précipitations ont surtout augmenté sur les continents dans les latitudes les plus septentrionales, tandis que des diminutions ont principalement touché les latitudes comprises entre 10°S et 30°N depuis les années 1970. La fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou la partie des précipitations totales imputable à de fortes pluies) a augmenté dans la plupart des régions (probable) ».

Les sources d'eau douce sont essentiellement la pluie et la neige. Leur volume dépend d'éléments très complexes dont la température. Les modèles physiques du climat sont loin d'être robustes. Les observations sont peu démonstratives. Que peut-on conclure, sinon que l'effort doit porter sur l'amélioration des modèles afin de réduire les incertitudes des scénarios du futur ?

De fait, le paragraphe 10.3.2 « *Water Cycle* » du rapport du groupe 1 (WG1) du GIEC de 2014 montre que des tendances commencent à être décelées dans l'analyse des précipitations. Cependant, la plupart des traitements sont faits sur un demi-siècle, ce qui est très court. Les tendances constatées seraient plus saisonnières que sur les valeurs moyennes. Ce qui est certain du point de vue thermodynamique, c'est que le cycle hydrologique est plus intense quand la température augmente,

car l'atmosphère contient plus d'eau sous forme vapeur, liquide ou glace. On peut en déduire une tendance à long terme concernant l'intensification des pluies. Quand cela sera-t-il significatif pour les cultures ? L'influence des modifications de la couche d'ozone semble constatée avec un bon degré de confiance pour la zone antarctique, mais ce problème est maintenant en passe d'être résolu par l'interdiction de l'usage des gaz CFC considérés comme responsables de ce trou dans la couche d'ozone (et d'un effet de serre) et, selon la NASA, celle-ci sera bientôt dans son état pré-anthropique.

Des études pour les grands projets de transferts d'eau

Au Maroc, les rapports réalisés à la demande du ministère en charge de l'eau « Projet 2015 » (transfert d'eau nord-sud) reprennent les données hydrauliques sur des séquences qui débutent en 1915 pour la pluviométrie et en 1939 pour les mesures de débit des grands fleuves. Aucune tendance n'est perceptible pour les débits. Une tendance est visible pour la pluviométrie à Tanger, mais l'industrialisation de la région peut avoir une influence sur la mesure. Les cycles sont bien visibles. Le rapport indique que l'on ne voit pas d'influence de la température sur les ressources hydriques et que l'on ne connaît pas l'évolution de l'évapotranspiration avec la température. On note que plus le climat est aride, moins il y a de corrélations. Les modèles de prévision de provenances variées indiquent des résultats qui varient de 20 à 160 % des valeurs actuelles.

Jessica Tierney, de l'institut océanographique Woods Hole aux US, et Pedro DiNezio, de l'université d'Hawaï, travaillent sur le régime des pluies dans les régions des Tropiques et du Pacifique pendant le dernier maximum glaciaire (allant de -26 000 à -19 000 ans), sur les conditions climatiques de la région de l'océan indopacifique, la principale source de chaleur et d'humidité pour l'atmosphère terrestre, plus sèches pendant le dernier âge glaciaire que pendant les périodes qui l'ont précédé et celles qui l'ont suivi (publié dans *Nature*, 19 mai 2013).

Ils ont comparé leur résultat avec celui fourni par douze modèles climatiques. Seul celui développé par le centre Hadley pour la prévision climatique et la recherche, installé dans les locaux du MET Office, l'organisme météorologique national du Royaume-Uni, a « trouvé » le phénomène...

« La bonne nouvelle est que le modèle d'Hadley combiné aux preuves géologiques montre la voie d'une amélioration de nos capacités à simuler et prédire les régimes de précipitation dans les tropiques. Plus nous étudions les mécanismes à l'œuvre dans le passé, mieux nous pourrions prévoir les changements climatiques qui affecteront les milliards d'habitants de ces régions du monde ».

Une étude intéressante a été présentée par l'IRD (Institut de recherche pour le développement) à l'université Montpellier II en 2012 sur l'analyse de l'évolution des chroniques de flux liquides dans les bassins du Congo et de l'Orénoque.

Les figures 6.2 et 6.3 ci-après en sont tirées. Elles présentent les variations interannuelles des débits de grands fleuves tropicaux : le Congo, l'Oubangui, la Sangha, l'Amazone et l'Orénoque. La figure suivante montre le séquençage de la chronique de débits annuels du Congo à Brazzaville de 1903 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles correspondantes.

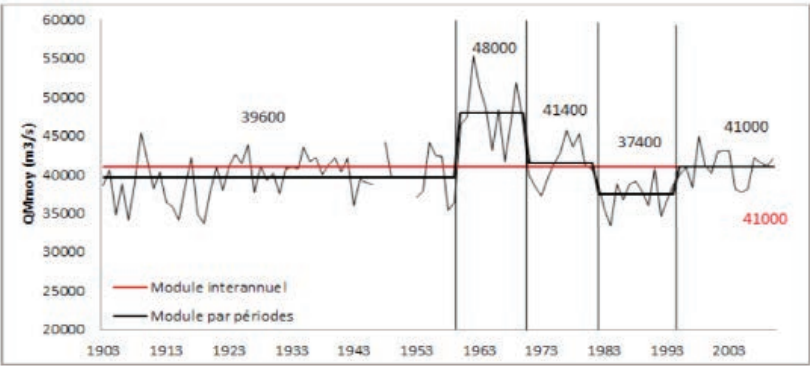


Figure 6.2 *Le Congo à Brazzaville. Cette figure montre le séquençage de la chronique de débits annuels de l'Oubangui à Bangui de 1936 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes interannuelles correspondantes*

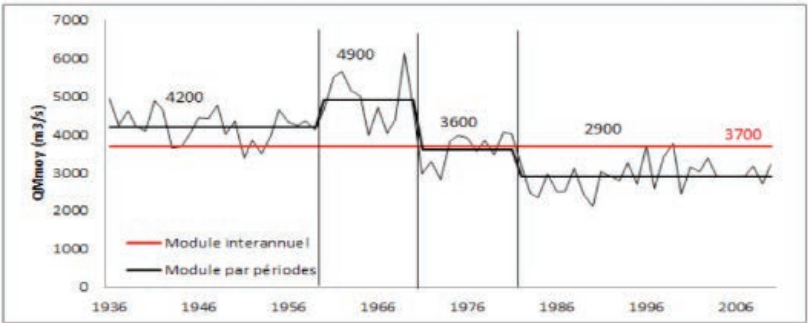
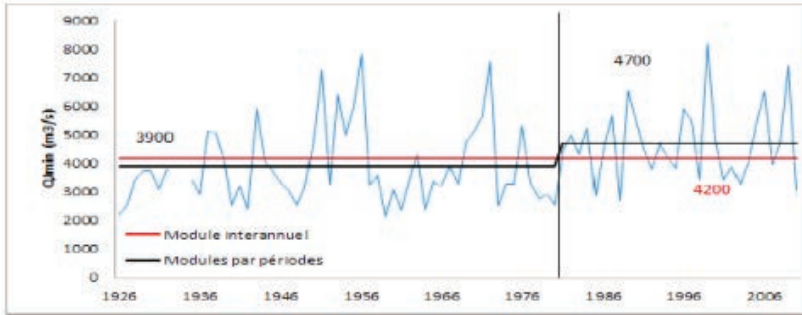


Figure 6.3 *L'Oubangui à Bangui*

La comparaison des débits des deux fleuves est intéressante, car le bassin versant du Congo est proche de l'équateur et dans l'hémisphère sud, loin vers l'est alors que le bassin versant de l'Oubangui est dans l'hémisphère nord. Il serait intéressant de pouvoir comparer les débits de l'Oubangui et ceux du Chari qui va vers le lac Tchad. L'Orénoque est situé en Amérique du Sud, au nord du bassin de l'Amazone avec lequel il entre en contact par le Rio Negro durant certaines périodes de crues. La figure 6.4 illustre le séquençage de la chronique de débits minimum mensuels de l'Orénoque à Ciudad Bolivar de 1926 à 2010 en périodes d'écoulements homogènes avec leurs moyennes mensuelles respectives.

Figure 6.4 *L'Orénoque à Ciudad Bolivar*

L'énergie électrique du Venezuela est majoritairement fournie par les aménagements hydroélectriques du Caroni, affluent rive droite de l'Orénoque (barrages de Guri, Tocoma, Caruachi, Macagua pour un total de 17 GW). Les variations de ressources du Caroni impactent directement les ressources énergétiques du pays.

La figure 6.5 suivante (archives Coyne et Bellier) est relative à l'exploitation du barrage de Kariba sur le Zambèze. Le lac Kariba est de très grande taille. Il régularise les débits du Zambèze. Le bassin-versant du Zambèze est situé sur les hauts plateaux angolais et alimenté par les pluies venues de l'Atlantique. On voit que le Zambèze est soumis à de grands cycles hydriques de 15 à 20 ans sans que l'on discerne une tendance.

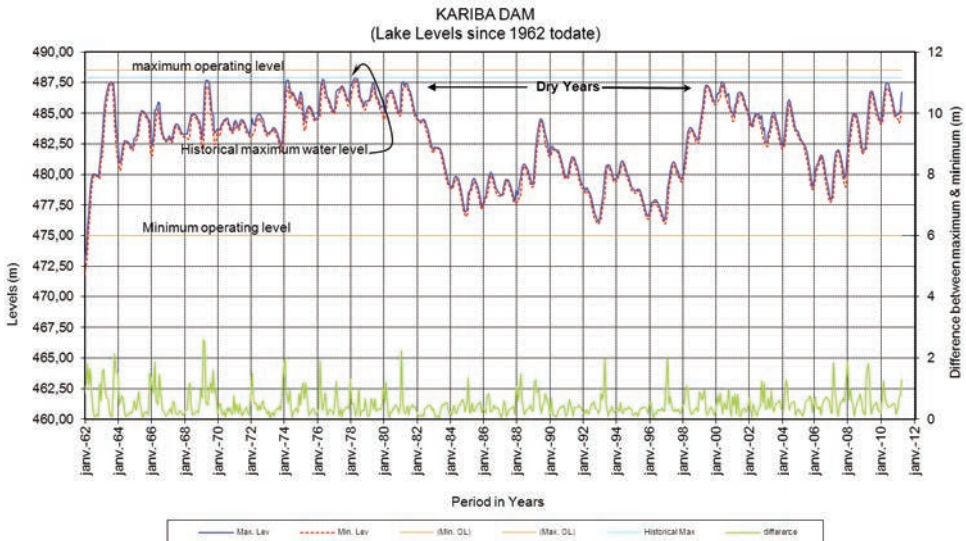


Figure 6.5 Niveau du lac Kariba de janvier 1962 à janvier 2012

La figure 6.6 suivante montre sur une longue période, depuis 1905, les écarts de long terme cumulés qui témoignent de très longs cycles et donc de la difficulté de planifier avec certitude la construction et l'exploitation des infrastructures pour l'aménagement des fleuves. À chaque période sèche, l'inquiétude monte. Les populations riveraines du lac se déplacent vers la nouvelle position des rives du lac, près de 10 mètres plus bas (l'équivalent d'une forte marée qui dure 15 ans...).

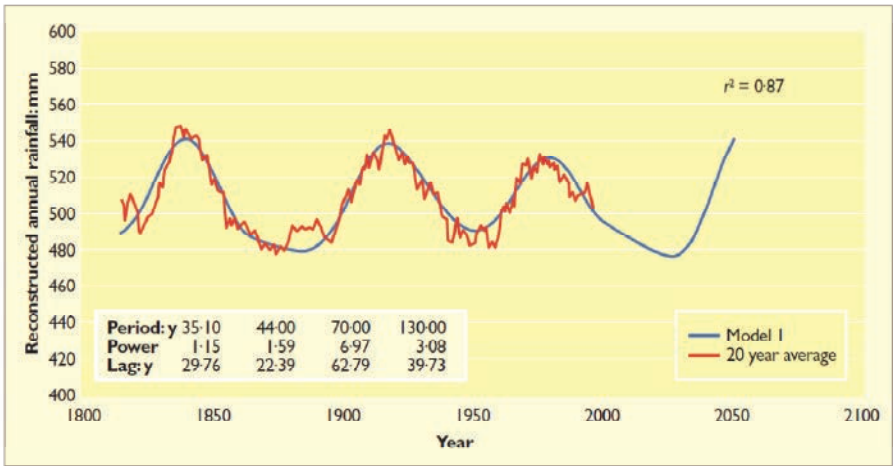


Figure 6.6 *Reconstruction des pluies annuelles en millimètres de 1800 à nos jours*

Devant l'ampleur de ces grands cycles, il n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de distinguer des tendances.

D'une façon générale, on ne distingue pas de tendance perceptible sur les débits des grands fleuves et les chercheurs ne voient pas d'influence directe du climat. En revanche, l'influence de l'augmentation du niveau des mers sur les débits estuariens pourrait induire des modifications en amont, par exemple sur des systèmes peu pentus comme l'Amazone ou l'Orénoque.

Le fait que l'on ne décèle pas de tendance évolutive des ressources hydriques, ni de corrélation entre la température et les ressources hydriques ne permet pas de conclure. Il n'y a pas de vraisemblance à supposer que le futur sera pire en tout lieu, comme si nous étions aujourd'hui dans un état d'optimum global exceptionnel. Le phénomène est tellement complexe et dépendant des particularités climatiques de chaque région que les modèles ne permettent pas, pour l'instant, de faire des prévisions hydrologiques vraiment crédibles (même si les températures sont bien mieux prévues) et cela d'autant plus qu'il n'y a que peu de mesures de calage, ni d'explications physiques complètes structurées de changements encore imperceptibles (ou se manifestant par des signaux très faibles). Pour la France, les météorologues ne mesurent pas clairement d'évolution des précipitations, alors qu'ils mesurent parfaitement l'augmentation des températures. Comme, par ailleurs, les prélèvements

dans les fleuves et les nappes ont tendance à augmenter, la mesure d'une tendance à l'intérieur des variations météorologiques est réellement difficile. Les difficultés rencontrées pour tirer un bilan clair doivent nous inciter à approfondir la question (y compris dans les aspects mathématiques (instabilité, bifurcations...)).

Dans son ouvrage *Histoire du climat depuis l'an mil* (éditions Flammarion, 1967), Emmanuel Le Roy Ladurie nomme « petit optimum médiéval » la période relativement chaude en Europe de l'ouest des années 800 à 1300 qui semble correspondre au climat d'aujourd'hui, une période plutôt favorable aux agriculteurs et aux consommateurs, même si la sécheresse était le « fait dangereux » de la zone méditerranéenne. Dans le reste de la France, l'excès d'humidité et le gel excessif étaient plus dommageables, comme il le montre pour le « petit âge glaciaire » (jusqu'en 1860). Nous n'avons pas d'archives historiques concernant des températures au-delà de plus ou moins 1 °C par rapport à la moyenne. En revanche, les archives paléontologiques (donc antérieures à la période historique) nous renseignent à ce sujet. Par exemple, on évalue une température de +12 °C par rapport à l'actuel au milieu de l'Éocène. Emmanuel Le Roy Ladurie commente avec son humour et sa modestie habituels : « *Je suis trop paresseux pour m'occuper des ressources en eau, c'est beaucoup trop capricieux* ». Dans ses livres, l'eau est présente tout le temps, puisque l'agriculture tient un rôle central, mais son étude historique n'est pas faite pour l'instant.

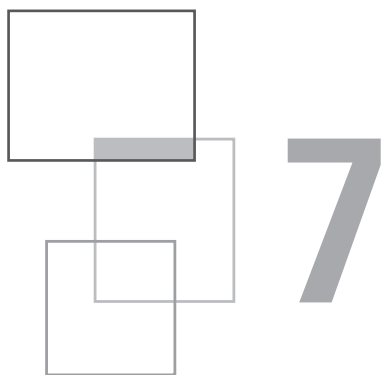
Un autre aspect de la question concerne l'impact de la température et des variations de ressources en eau sur la production agricole, et notamment vivrière. Si la température augmente, le cycle végétatif se raccourcit : plus il fait chaud, plus le temps passe vite pour la plante, jusqu'à une limite supérieure de 32-34 °C au-delà de laquelle la plante ne peut plus s'adapter. Il n'y a pas d'optimum de température. Les espèces et les variétés sont sélectionnées pour optimiser la production en fonction du climat local. Le monde agricole adapte sa pratique et ses sélections de production en fonction du climat, à l'intérieur de la variabilité qu'il a expérimentée. Par exemple, les catégories de précocité sont adaptées à la latitude. Pour les arbres, surtout ceux à croissance lente, l'adaptation est plus longue et peut avoir un coût pour les forestiers. Le monde agricole, même traditionnel, est dynamique et s'adapte en permanence.

Des perspectives délicates

Les incertitudes demeurent importantes : même si l'augmentation de température accélère le cycle hydrologique, on éprouve encore des difficultés à en prévoir les conséquences. Les modèles doivent être améliorés et leur utilisation être raisonnable et... raisonnée. C'était l'un des objets majeurs de la synthèse : *Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire*, de Claudine Schmidt-Lainé et Alain Pavé publiée en 2002 par Elsevier.

On voit aussi que l'étude du passé aux échelles historiques, préhistoriques et paléontologiques devrait être mieux prise en compte et même développée, au moins dans

ce contexte. On conviendra que l'échelle historique correspond au passé pour lequel on dispose d'archives écrites, l'échelle préhistorique inclut les archives d'autres natures et enfin l'échelle paléontologique prend en compte les archives antérieures aux sociétés humaines. Ces travaux devraient concerner les variations climatiques et leurs effets en ajoutant, pour la période historique, l'histoire des techniques de gestion de l'eau, des pratiques et des produits agricoles. Bien entendu, toute recherche de progrès technologique améliorant la gestion des systèmes hydrologiques, plus généralement de la ressource en eau, stockage y compris, des milieux fluviaux et lacustres doit être privilégiée.



Le méthane

Pourquoi parler spécifiquement du méthane ? On parle généralement du dioxyde de carbone CO_2 , parce qu'il résulte de la combustion du carbone fossile sous toutes ses formes et qu'il est donc la conséquence directe de l'action des hommes. L'assimilation chlorophyllienne des plantes absorbe le CO_2 et, à l'inverse, la respiration des êtres vivants transforme l'oxygène de l'air en CO_2 , mais cette émission est considérée comme relativement stable, donc sans influence à court terme sur le climat. Mais l'activité biologique influe aussi grandement sur le cycle du méthane. Le méthane est un gaz ayant une influence considérable sur l'effet de serre. Son « équivalence » CO_2 dépend beaucoup de l'horizon utilisé, avec l'horizon retenu dans le cadre du protocole de Kyoto, le facteur d'équivalence retenu est de 25.

Le méthane est un combustible, c'est le gaz naturel que nous brûlons dans nos maisons. À la fin, le méthane se transforme en CO_2 qui est très stable et en eau. Le méthane est un gaz à effet de serre extrêmement puissant, à durée de vie courte. Toute variation des émissions de méthane a donc un effet important sur le climat, mais non durable. Une grande partie des émissions de méthane est naturelle, avec des rétroactions anthropiques possibles. C'est pour cela que le méthane mérite une attention particulière, des mesures atmosphériques dédiées et des modèles spécifiques.

Ce chapitre contient de larges extraits du rapport de l'Académie des technologies intitulé *Le méthane, d'où vient-il et quel est son impact sur le climat*, voté le 9 janvier 2013 et rédigé par un groupe de travail animé par Jean-Claude André et Bernard Tardieu (avec Olivier Boucher, Philippe Bousquet, Marie-Lise Chanin et Jérôme Chapellaz). Il a été relu et amélioré par Valérie Masson-Delmotte, Benjamin Dessus, Hervé Le Treut, Olivier Appert, Patrice Desmarets, Pierre Feillet, Bruno Jarry, Jean-François Minster, Jean Denègre, Muriel Beauvais et François Lefaudeux.

Qu'est-ce que le méthane ?

- Le méthane est un gaz à effet de serre dont l'efficacité radiative est beaucoup plus grande que celle du dioxyde de carbone pour piéger l'énergie rayonnée par la Terre et contribuer ainsi au changement climatique.
- C'est un gaz chimiquement actif qui joue un rôle important pour la production d'ozone, le bilan de vapeur d'eau dans la stratosphère et la capacité qu'a l'atmosphère d'oxyder les constituants qu'elle contient.
- La concentration atmosphérique du méthane est en augmentation, certes parfois irrégulière, mais persistante sur le long terme, depuis plusieurs siècles, ce qui en fait un des acteurs très importants de la question climatique.
- Le méthane offre des possibilités intéressantes de réduction de ses émissions d'origine anthropique, qui sont pour beaucoup d'entre elles « sans regret », c'est-à-dire demandant moins de changements dans nos modes de vie que pour le dioxyde de carbone et présentant des effets secondaires eux aussi bénéfiques.
- Le méthane est, en grande partie, produit et absorbé par des processus à petites échelles mettant en jeu de multiples interactions avec le monde du vivant, tant végétal (terrestre et marin) qu'animal, ce qui donne à ses puits et sources une variabilité très complexe.
- Les complexités de la dynamique du climat et des cycles biogéochimiques rendent possibles quelques (mauvaises) surprises quant à l'évolution des sources naturelles de méthane, évolutions qui ont suivi les cycles glaciaires-interglaciaires passés et qui pourraient en retour rétroagir positivement avec le changement climatique pour en accentuer l'amplitude.

D'où vient-il ?

Trois processus expliquent la production de méthane sur notre planète :

- le plus important, de loin, est la fermentation anaérobie de la matière organique qui conduit à une formation d'origine *biogénique* du méthane. Cette fermentation est développée par des archées méthanogènes sensibles à la température et qui présentent une activité maximale lorsque la température est située entre 35 et 40 °C (toutefois, certaines archées se sont adaptées pour une activité optimale à des températures plus basses). Cette fermentation se produit à la fois en relation avec le monde végétal (zones humides), le monde animal (pour l'essentiel dans la panse des ruminants) et le monde « anthropisé » (décharges, déchets agricoles, eaux usées). C'est principalement la cellulose qui est ainsi transformée. Cette source de méthane raconte la vie de la cellulose sur notre planète ;
- le deuxième processus est associé à la combustion incomplète de la biomasse, lors notamment des feux de forêts et des brûlis agricoles. On parle d'une source *pyrogénique* de méthane ;
- le troisième processus, appelé *thermogénique*, est lié à la formation des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) au cours des ères géologiques passées par décomposition bactérienne puis craquage thermique (pyrolyse) puis

migration depuis les profondeurs de la Terre vers la surface. On parle de méthane fossile (non limité *stricto sensu* au méthane d'origine thermogénique) quand il est dépourvu de carbone 14, c'est-à-dire que sa production s'est faite il y a plus de 50 000 ans. Ce méthane fossile peut être d'origine anthropogénique (exploitation des mines de charbon, exploitation du gaz naturel qui est pour l'essentiel du méthane, et du pétrole) ou naturel (décomposition spontanée de clathrates ou hydrates de méthane piégés dans les océans ou les sols). Dans le futur, la décomposition anaérobie de substrats organiques enfouis dans les pergélisols depuis des millénaires sera aussi pauvre en carbone 14 et contribuera au méthane dit « fossile ». Certaines sources actuelles comme les sources géothermales marines ou terrestres peuvent combiner des processus biogéniques et thermogéniques.

Le tableau suivant figure 7.1) présente les ordres de grandeur des quantités de méthane émises ou absorbées en téragrammes (Tg CH₄/an, équivalent au million de tonnes) et la gamme de valeurs retenue dans la littérature scientifique pour chaque type d'émission ou de puits.

Natural sources	Methane flux (Tg CH ₄ yr ⁻¹) ^a	Range ^b
Wetlands	174	100–231
Termites	22	20–29
Oceans	10	4–15
Hydrates	5	4–5
Geological	9	4–14
Wild animals	15	15
Wild fires	3	2–5
Total (natural)	238	149–319
Anthropogenic sources		
Coal mining	36	30–46
Gas, oil, industry	61	52–68
Landfills and waste	54	35–69
Ruminants	84	76–92
Rice agriculture	54	31–83
Biomass burning	47	14–88
Total, anthropogenic	336	238–446
Total, all sources (AR4) ^c	574 (582)	387–765
Sinks		
Soils	–30	26–34
Tropospheric OH	–467	428–507
Stratospheric loss	–39	30–45
Total sinks (AR4)	–536 (581)	484–586
Imbalance (AR4)	38 (1)	–199–281

Note: ^a Values represent the mean of those provided in Denman et al (2007, Table 7.6) rounded to the nearest whole number. They draw on eight separate studies, with base years spanning the period 1983–2001. ^b Range is derived from values given in Denman et al (2007, Table 7.6). Values from Chen and Prinn (2006) for anthropogenic sources are not included due to overlaps between source sectors. ^c Values in parentheses denote those provided in the IPCC Fourth Assessment Report (AR4) as the 'best estimates' for the period 2000–2004.
Source: Values derived from Denman et al (2007)

Figure 7.1 Sources et puits de méthane (d'après Bousquet, 2007). Wetlands - zones humides ; Landfills and wastes - décharges et dépotoirs ; Wild animals - animaux sauvages ; biomass burning - combustion de biomasse ; Wild fires - incendies de forêts ; Coal mining - mines de charbon ; Sink - puits

Les zones humides (30 %)

Définition et étendue

Les zones humides sont définies scientifiquement comme les zones géographiques où le sol est saturé d'eau et où la profondeur de l'eau est inférieure à 1 mètre. On peut aussi définir les zones humides comme l'interface entre les écosystèmes terrestres et les écosystèmes aquatiques, que l'eau soit douce, saumâtre ou salée. En France, la définition juridique est la présence de sols hydromorphes et/ou de plantes hygrophiles. Cette définition exclut les cours d'eau.

Dans les zones inondées, la production de méthane par des archées méthanogènes recyclant la matière organique en milieu anaérobie dépend principalement de la température, de l'hydrologie, de la quantité de matière organique accumulée, du type de végétation et de la chimie des matériaux organiques. Une grande partie de cette production est oxydée en CO_2 avant d'atteindre l'atmosphère. Cependant, une fraction du méthane produit peut être émise dans l'air par diffusion (si la zone aérobie en surface reste peu profonde), par bullage ou par transport dans le système vasculaire de certaines plantes. L'émission de bulles décroît rapidement quand l'épaisseur d'eau augmente et elle est accélérée par le vent et les courants, comme cela a été montré par des mesures faites par exemple au lac Gatun au Panama (qui constitue la partie centrale du canal de Panama) et au lac Calado (dans la plaine amazonienne). Très récemment, l'extension temporelle des observations directes de flux de CH_4 depuis des marécages de haute latitude a permis de révéler un phénomène non encore appréhendé : le regel des marécages en surface au cours de l'automne conduit à des émissions très importantes de méthane vers l'atmosphère, probablement par simple effet de pressurisation et de dégazage des sédiments sous-jacents. Ceci n'était pas pris en compte dans les estimations d'émissions de CH_4 par les marécages à l'échelle globale.

Une grande source d'incertitude provient d'une part de la mauvaise connaissance, malgré les mesures satellitaires, de la surface totale des zones humides, estimée à $5,3 \text{ Mkm}^2$ et d'autre part à la variabilité hydrologique des surfaces humides, qu'elle soit saisonnière, annuelle ou interannuelle. Ces $5,3 \text{ Mkm}^2$ de zones humides couvrent environ 4 % des surfaces émergées. Ils se décomposent en 2 millions de km^2 pour les zones humides tropicales, $0,6 \text{ Mkm}^2$ pour les zones tempérées et $2,7 \text{ Mkm}^2$ pour les zones boréales. Les zones humides tropicales sont les principaux émetteurs ($\sim 90 \text{ Tg CH}_4/\text{an}$). Les zones humides boréales participent au bilan global, mais leurs émissions restent encore mal connues (voir, par exemple, le phénomène de dégazage automnal tout juste révélé) : d'une part car les mesures sont peu nombreuses et discontinues, d'autre part parce que les effets du réchauffement sur ces régions sont encore mal appréhendés. En effet, un sol gelé blanc ou clair a un fort albédo et est inerte. La même zone dégelée se couvre de végétation, a un albédo moins fort et peut chauffer en été lorsque l'épaisseur d'eau est faible. Si le sol se dessèche parce que la nappe phréatique s'enfonce, alors le sol devient un puits de carbone entre la surface et la zone de production en profondeur.

Cette surface des zones humides est à comparer à la surface des lacs : 1 Mkm^2 en eau douce et $1,5 \text{ Mkm}^2$ en eau saumâtre. Les lacs d'eau douce, notamment boréaux, ont aussi reçu une attention particulière au cours des dernières années. Leur profondeur

limite fortement les émissions par diffusion, mais ils pourraient contribuer aux émissions de méthane dans l'atmosphère à hauteur de 15 à 35 Tg CH₄/an [Walter *et al.*, 2007] par le phénomène de bullage. Par ailleurs, l'augmentation des températures aux hautes latitudes conduit à la fonte localisée des pergélisols qui, en s'effondrant, donnent naissance à de petits lacs appelés « lacs thermokarstiques ». Avec des profondeurs d'eau relativement faibles, ces nouveaux lacs contribuent à augmenter les émissions de méthane des zones humides en régions boréales. Enfin, les plaines fluviales inondées saisonnièrement jouent probablement aussi un rôle, encore mal estimé, dans les émissions de méthane.

Exemples

Quelques exemples sont donnés par la figure 7.2 ci-après des zones inondées fluviales ou lacustres, afin d'illustrer la variété géographique de ces étendues d'eau.

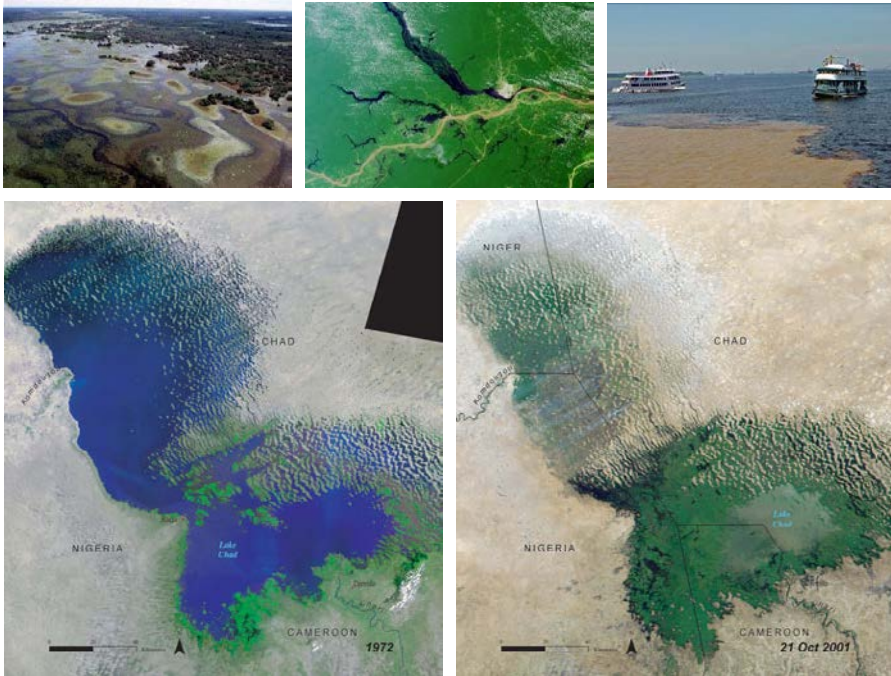


Figure 7.2 En haut à gauche, photo du Pantanal (Brésil, Mato Grosso), la plus grande zone humide de la planète (classée au patrimoine mondial de l'Unesco) et que l'Amazone inonde chaque année sur 140 000 km². Elle abrite une faune d'une richesse exceptionnelle. En haut au milieu, une image satellitaire du confluent de l'Amazone (en bistre) et du Rio Negro (en bleu-noir), avec la ville de Manaus visible au confluent. En haut à droite, les eaux des deux fleuves coulent un long moment ensemble avant de se mélanger. En bas, deux images satellitaires du lac Tchad à presque 30 ans d'intervalle : à gauche en 1972, à droite en 2001. Le lac Tchad avait une surface de 300 000 km² il y a 2 000 ans, 26 000 km² en 1950 et 1 350 km² aujourd'hui. Il a été totalement transformé en simple zone humide (de couleur verte) lors de sécheresses prolongées comme en 1983.

Un autre exemple de zone humide de très grandes dimensions est la grande plaine de Sibérie, entre l'Oural à l'ouest et le fleuve Iénisseï à l'est. Elle couvre 2,7 Mkm² dont 50 % sont à une altitude inférieure à 100 mètres. Les fleuves Iénisseï et Ob font d'innombrables méandres dont beaucoup sont abandonnés. C'est dans cette région que se trouve le marais de Vassiougan qui couvre de 50 000 à 60 000 km².

La question des émissions de méthane associées à la production d'énergie hydroélectrique est parfois évoquée. Les lacs artificiels diffèrent des lacs naturels durant leur période de remplissage ; ensuite ils se comportent de la même manière. Des mesures nombreuses ont montré que la transition dure quelques années durant lesquelles les émissions de méthane et de H₂S peuvent être plus élevées avant que le lac artificiel ne s'intègre, comme le lac Gatun au Panama qui existe depuis un siècle et qui constitue le canal de Panama. Plus précisément, l'émission de méthane est proportionnelle à la quantité de biomasse immergée, à la température de l'eau et au temps de résidence de l'eau dans le lac. Les émissions par diffusions disparaissent après 3 ans à cause du développement de bactéries méthanotrophes qui oxydent le méthane. Les émissions par bullage diminuent progressivement, en fonction de la profondeur de l'eau. La seule spécificité des usines hydroélectriques est que l'eau de la retenue se détend dans l'aspirateur de la turbine après qu'elle ait transmis son énergie à la roue de turbine. S'il existe des gaz dissous dans l'eau, ceux-ci sont libérés. Cela peut être du méthane inodore ou du H₂S qui ne l'est pas. Ce méthane peut être récupéré et utilisé comme biogaz local. Des expérimentations ont été faites au Brésil. En Guyane française le barrage de Petit-saut crée un lac de surface considérable (310 km²), qui a noyé la forêt tropicale. Les premières années après le remplissage de la retenue (1994), les émissions de méthane ont atteint 800 tonnes de méthane par jour, les émissions ont diminué à 200 tonnes par an en 1997, puis plus lentement, vers 100 tonnes par an.

Classement des zones humides dans le monde

On peut les diviser en zones tropicales ou subtropicales et en zones boréales et tempérées. Les premières sont caractérisées par des températures élevées, des précipitations importantes et des cycles de crue avec inondations longues. Les secondes sont caractérisées par des températures variables plutôt basses et par une interaction saisonnière entre la température et le cycle hydrologique. L'activité des archées méthanogènes dépendant fortement de la température, celle-ci et le contenu variable en carbone organique des sols sont des facteurs importants pour évaluer les émissions de méthane de ces deux zones.

Notons que les zones humides sont protégées par la Convention de Ramsar (2 février 1971, entrée en vigueur le 21 décembre 1975). Cette Convention est un traité intergouvernemental qui incarne les engagements de ses États-membres à maintenir les caractéristiques écologiques de leurs zones humides d'importance internationale et à planifier l'utilisation durable de celles-ci. Ces zones humides servent de relais lors de la migration des oiseaux. Elles jouent un rôle important dans le cycle de l'eau pour régulariser les apports et restaurer la qualité. Certaines zones humides plus fragiles que d'autres peuvent quasiment disparaître si l'eau des fleuves est détournée

avant d'atteindre le lac. Ce fut le cas de la mer d'Aral, L'Amou Daria et le Syr Daria ont été détournés pour irriguer les plaines cotonnières. La restauration partielle de la mer d'Aral est en cours.

Ces accords protègent les zones humides à cause de leur richesse biologique et donc de leur contribution à la biodiversité et de leur impact sur le cycle de l'eau et de l'azote. Ceci inverse la tendance depuis l'antiquité romaine à réduire les zones humides pour lutter contre les maladies (la malaria, le « mauvais air » de la plaine de Rome) et augmenter les zones cultivables. Aujourd'hui 1,61 Mkm² de zones humides sont déclarés d'intérêt remarquable.

La culture du riz (9 %)

Rappelons tout d'abord que le riz est une culture qui peut survivre en milieu totalement saturé d'eau. C'est d'ailleurs la seule céréale qui y survit. On peut donc considérer que la culture du riz dans les zones naturellement inondées durant les périodes de pluie est une adaptation au milieu « zone humide ». C'est une manière d'utiliser la zone humide qui ne modifie pas sensiblement ses émissions de méthane. Ainsi, les premières cultures du riz en Chine, il y a environ 5 000 ans, étaient souvent établies sur des zones humides existantes, l'irrigation n'apparaissant que plus tard [Fuller *et al.*, 2011].

La culture en rizière est une pratique culturelle caractéristique des zones de moussons où 90 % de la récolte de riz est effectuée. Le riz peut s'adapter à de nombreux environnements de croissance : zones inondées permanentes ou intermittentes, zones simplement arrosées par les pluies, zones sans ennoiment avec ou sans nappe phréatique affleurante. Une proportion croissante du riz est produite en milieu sec (*upland*), sans ennoiment, avec l'intérêt de ne pas émettre de méthane. Par contre, la culture en rizière ennoyée facilite la préparation du sol et le repiquage, élimine les mauvaises herbes et, dans les zones de forte pluviométrie, permet d'écarter les pluies d'orage et de diminuer les crues.

Il est fréquent que le riz soit cultivé, au cours de l'année, en alternance avec des légumes ou des pommes de terre, en sec, comme à Madagascar par exemple. Même lorsque la méthode par ennoiment est utilisée, la phase d'immersion dure de 1 à 2 mois et le sol redevient sec ensuite.

En général, la profondeur d'eau est de quelques dizaines de centimètres (jusqu'à 60 cm). Le remplissage se fait par l'eau de pluie, par des pompes en nappe (par exemple en Inde) ou par des canaux d'irrigation avec, fréquemment, des systèmes de vannage d'une parcelle à l'autre. Pendant la période d'ennoiment, les archées méthanogènes en condition anaérobie produisent du méthane [Neue et Roger, 2000 ; Shearer et Khalil, 2000]. Comme dans les zones humides dont les rizières font partie, la production de méthane dépend de la quantité de matière organique contenue dans le sol. Elle est maximale lorsque les racines atteignent leur extension maximale.

La production de méthane commence quelques jours à quelques semaines après la mise en eau de la rizière. Le méthane est produit dans le sol profond. Il s'échappe par les plantes elles-mêmes – aérénchyme – (89 %), par bullage (10 %) ou par diffusion (1 %). La plante développe le système aérénchyme pour transporter l'oxygène vers les racines à partir desquelles l'oxygène diffuse dans le sol, tandis que le méthane suit le chemin inverse. Dans la rhizosphère (épaisseur superficielle décimétrique du sol influencée par les racines et les microorganismes associés), le méthane produit par les archées méthanogènes dans le sol est plus ou moins oxydé par les archées ou les bactéries méthanotrophes en présence d'oxygène et transformé en acide formique ou en méthanol.

En conclusion, ce n'est pas le riz qui émet plus de méthane qu'une autre plante, c'est le mode cultural dominant qui consiste à noyer la zone de culture et à la transformer en zone humide. Les principes de génération du méthane sont donc les mêmes que dans les zones humides. Si une zone humide naturelle est transformée en rizière, il n'y a pas de modification majeure du processus d'émission. On peut alors dire que l'impact anthropique net de la culture du riz est nul, sauf si l'irrigation conduit à ennoyer les parcelles concernées plus longtemps qu'à l'état naturel. Si le riz est cultivé « en sec », comme c'est de plus en plus souvent le cas en Afrique et en Asie à cause de tensions sur les ressources en eau, il n'y a pas de différence significative par rapport à d'autres céréales et pas (ou très peu) de méthane est émis par la culture. La modification des pratiques culturales peut conduire à une augmentation de la production de riz tout en réduisant les émissions de méthane. Par exemple, un drainage de l'eau une ou plusieurs fois au cours de la saison de croissance aère le milieu et peut entraîner une réduction qui peut atteindre 80 % des émissions de méthane tout en augmentant les rendements et en limitant la capacité de développement de vecteurs de maladies tropicales comme le paludisme. En moyenne, on estime qu'une rizière drainée plusieurs fois émet 50 % de méthane de moins qu'une rizière inondée en permanence, mais encore 2 fois plus qu'une rizière simplement arrosée par les pluies [Conen, *Ibid.*].

Les émissions mondiales de méthane dues aux rizières sont estimées autour de 50 Tg CH_4/an , mais avec une incertitude importante, notamment due au manque de connaissances quantitatives de l'impact de l'évolution des pratiques culturales. Les estimations ont tendance à baisser avec le temps, étant plutôt autour de 80 Tg/an dans les années 1980 et autour de 30 Tg/an pour les années 2000. Qu'en est-il des émissions ? La recherche d'amélioration des rendements conduit à diminuer la production de méthane, puisque celle-ci consomme de l'énergie prélevée sur les ressources de la plante.

Les recherches sur la culture du riz portent principalement sur sa capacité à tolérer des sécheresses plus longues afin de limiter les variations de production et de prix, et non dans le but de faire baisser les émissions de méthane. Mais il se trouve que la recherche de pratiques culturales économes en eau conduit aussi à une diminution de la quantité de méthane émise par tonne de riz produit.

Le riz joue un rôle fondamental dans l'alimentation humaine. C'est la seule céréale qui survit en milieu saturé en eau. Un cultivateur, dans un milieu donné, optimise

sa production en fonction de la surface et de la morphologie du terrain dont il dispose, de la quantité d'eau disponible et du coût des intrants. La culture par ennoisement est la seule solution en zones noyées temporairement ; c'est aussi une solution pour faciliter le repiquage manuel et éviter les mauvaises herbes. Répétons-le, ce n'est pas le riz comme céréale qui est en cause dans les émissions de méthane, c'est un type de mode cultural par ennoisement qui est passé d'une nécessité d'adaptation au milieu zone humide à un choix cultural économique dans certaines régions. On peut travailler à mettre au point des pratiques culturales qui réduisent les surfaces cultivées en ennoisement artificiel, mais le riz ne peut être mis en cause.

Animaux d'élevage et animaux sauvages (17 %)

Les animaux produisent du méthane par la digestion microbienne anaérobie dans leur système digestif, par la dégradation microbienne de leurs excréments notamment dans les fumiers, lisiers, etc. On notera à titre anecdotique qu'environ un tiers des humains émettent également du méthane, leur métabolisme impliquant des archées méthanogènes dans le colon. Les émissions mondiales de méthane dues aux animaux d'élevage sont estimées (voir tableau p. 90) à 84 Tg CH₄/an. Par contre, un simple argument de proportionnalité entre le nombre de ruminants sauvages (75 millions environ) et d'animaux d'élevage (1,4 milliard de bovins, 1 milliard d'ovins, presque autant de porcs et un peu moins de chèvres) conduit à estimer les émissions des premiers à environ 2 Tg/an, plutôt qu'à 15 Tg/an comme indiqué dans le tableau. Néanmoins, les ruminants sauvages contribuaient probablement plus au bilan naturel du méthane avant la période préindustrielle, compte tenu, depuis, de l'effondrement des populations de bisons en Amérique du Nord et de l'anthropisation des territoires. Au total, les émissions des ruminants d'élevage ou sauvages représentent 17 % du total des émissions de méthane aujourd'hui.

Les herbivores se sont spécialisés dans la digestion des végétaux contenant de la cellulose (lignine) de façon à les transformer en nutriments. La panse et la capacité de ruminer sont les éléments essentiels de cette stratégie. Des microorganismes au métabolisme anaérobie se développent et font fermenter les végétaux. Une température très stable (39 °C), un pH stable (6,5-6,8) et le flux constant de végétaux (les bovins broutent de nombreuses heures par jour) favorisent le bon fonctionnement de ce système qui produit de l'hydrogène métabolique. Les archées méthanogènes utilisent cet hydrogène avec le CO₂ et produisent du méthane. Ce méthane, ainsi que le dioxyde de carbone, sont relâchés de la panse principalement par la bouche des ruminants (éruption) et absorbés par le sang. Le méthane produit dans les intestins, partiellement émis par le rectum, ne représente que 13 %. Les émissions des ruminants sauvages sont très variables, sans que l'on en connaisse la cause : nourriture, mode de vie ou autres facteurs ; par exemple, les chevreuils et les lamas en émettent peu.

Les très nombreux animaux qui utilisent la fermentation intestinale pour leur digestion émettent du méthane. Dans l'herbe, la lignine est difficile à digérer et c'est la

dégradation de la lignine qui est associée à la production de méthane dans le rumen. Or cette émission consomme de l'énergie. Réduire les émissions de méthane permettrait en même temps d'améliorer l'efficacité nutritionnelle des animaux et les pratiques d'élevage. Ceci est surtout valable pour les animaux élevés hors-sol, en batterie. Lorsque les animaux sont élevés en prairie naturelle, c'est l'ensemble du système animal-prairie qu'il faut analyser. Les émissions d'un bœuf sont à comparer avec les émissions et les puits de l'hectare de prairie qu'il occupe. La prairie peut être puits ou source selon son degré de saturation en eau, sa température et sa concentration en azote. Le bœuf qui broute n'est qu'un des acteurs du système, il faut en analyser les intrants et les sortants : si la prairie est fauchée, le foin est exporté avec son carbone ; si la prairie est pâturée, la viande et le lait sont exportés, mais les déjections restent ; si la prairie est naturelle, la matière végétale se dégrade en fin de saison et peut émettre du méthane, surtout si la fin de saison est humide. On n'a pas trouvé mieux qu'un ruminant en prairie naturelle pour transformer des matières végétales non digérées par l'homme en protéines assimilables par l'homme. Toutefois, on ne peut attribuer la totalité des émissions de CH_4 à la seule production de viande car on produit aussi du lait et du cuir.⁷

Les fumiers, les lisiers et l'ensemble des déchets provenant des excréments d'animaux produisent du méthane au cours de leur fermentation. Ces produits sont décomposés par les microorganismes. Si le fumier est entassé, la décomposition est anaérobie, c'est-à-dire qu'elle se déroule dans un milieu pauvre en oxygène. Il y a alors une forte production de méthane. Lorsque le fumier est épandu sur le sol, la décomposition s'effectue au contact de l'air et la plus grande partie du carbone de la matière organique est décomposée en CO_2 [INRA, 2011].

Les termites (4 %)

Les termites représentent une source importante de méthane (22 Tg/an). Les premières estimations datant du début des années 1980 leur attribuaient même jusqu'à 50 Tg/an. Apparentés aux blattes et aux cafards, il y aurait 3 tonnes de termites par être humain (un termite pèse de 3 à 5 grammes). Ils vivent en colonies de millions d'individus organisées en castes physiquement différenciées. Pendant la période reproductive, ils portent quatre ailes : on les appelle allates. Ils servent de nourriture à de nombreux animaux (oiseaux, amphibiens, reptiles...). Les termites se développent préférentiellement en l'absence de rayonnement solaire, en atmosphère immobile, dans des matériaux saturés ou très humides, avec des températures élevées et stables et des concentrations de CO_2 élevées. Les émissions augmentent rapidement si la température augmente par rapport à la moyenne. *Fraser et al.* [1983] estiment que les termites préfèrent une température de 10 °C supérieure à la température ambiante. Ils estiment la production à 3,2 mg CH_4 par gramme de

7. On peut même affirmer que jusqu'à une époque très récente, en Occident, la viande et le cuir étaient *de facto* des sous-produits de la production laitière et dérivés (fromages, crème, beurre).

bois. Bien que l'action des termites soit notable dans les pays tempérés (attaque des boiseries et charpentes du bâtiment), 80 % des émissions se situent dans les zones tropicales, dans les forêts, les prairies et les savanes, arborées ou non.

Le méthane est produit durant la digestion du fait de la dégradation de la cellulose par les micro-organismes symbiotiques. Les émissions sont très variables selon les espèces et dépendent du taux d'humidité, de la température et de la concentration de l'air du sol en CO_2 et O_2 . Les émissions dépendent de la taille de la termitière, de la densité de la population de termites, de leur activité et des espèces. Des travaux récents montrent que la densité de population de termites constituerait le facteur prépondérant de contrôle. Des variations diurnes ont été constatées. L'émission varie durant la journée avec un minimum au petit matin et un maximum en fin d'après-midi. Ces travaux se sont intéressés aux échanges de CH_4 et CO_2 à la surface du sol au voisinage des termitières. Les mesures faites entre 1 mètre et 20 mètres du centre de la termitière montrent une décroissance de la concentration de méthane, preuve que le méthane est décomposé par les micro-organismes du sol. Le méthane atteignant l'atmosphère ne constitue qu'une petite partie du méthane produit par les termites dans la termitière. Il a été montré par des analyses isotopiques que la majeure partie du méthane était oxydée par des archées ou bactéries méthanotrophes au sein même de la termitière.

Les décharges (9 %)

Les décharges contrôlées ou sauvages où sont déversées toutes sortes de déchets peuvent émettre des quantités importantes de méthane. Les matériaux organiques qui fermentent en milieu anaérobie sont source de méthane. Les émissions mondiales de méthane produites par les décharges sont estimées (cf. tableau figure 7.1) à 47 Tg CH_4 /an, soit 9 % du total des émissions.

En Europe, les décharges non contrôlées devraient avoir disparu, puisque la loi les interdit.

La récupération du méthane issu des décharges est développée au Royaume-Uni, en Italie et au Canada. En France, les bus de la communauté urbaine de Lille sont alimentés par le méthane issu de la fermentation des déchets urbains. Les déchets agricoles fermentés dans des cuves étanches constituent également une source de méthane, récupérée en totalité comme ressource énergétique (biogaz utilisé pour le chauffage d'installations agricoles par exemple) et donc transformée *in fine* en CO_2 . Aux États-Unis et au Canada, le nombre de décharges est encore élevé, mais la tendance est aussi à récupérer le méthane, à le torcher ou à l'utiliser. Mais de nombreuses torchères insuffisamment alimentées en air laissent échapper une quantité importante de méthane.

Dans les pays émergents, les décharges ont souvent des dimensions gigantesques. Des familles en vivent, faisant un tri sélectif élaboré pour recycler tout ce qui peut avoir une valeur marchande. Le système de tri est en général très hiérarchisé.

Dans le dépôt, les déchets organiques et végétaux non récupérables sont entassés et ce sont eux qui, en fermentant, peuvent produire du méthane.

Si les dépôts sont non compactés et fréquemment retournés, la fermentation est aérobie et produit de l'eau et du CO₂. Si les dépôts sont compactés et recouverts rapidement, l'oxygène est rapidement consommé dans la masse et la fermentation est anaérobie : elle produit du CO₂ et du méthane. Cependant, le méthane en s'échappant traverse la partie superficielle du dépôt et est partiellement oxydé en CO₂.

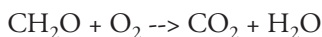
Tout le monde connaît la fermentation du glucose en alcool avec émission de CO₂ (les bulles du champagne, du cidre...), puis en acide acétique (le vinaigre). Le processus est beaucoup plus complexe pour la cellulose et pour les protéines. Pour que la fermentation se produise, il faut la présence de trois groupes trophiques de procaryotes anaérobies :

- un premier groupe provoque l'hydrolyse des polymères biologiques initiaux pour produire des sucres solubles, des aminoacides, des chaînes longues d'acide carboxyliques et des glycérols. Il s'agit du début de la décomposition qui conduit à des chaînes courtes d'acides carboxyliques, de l'alcool, du CO₂, de l'hydrogène et des acétates, précurseurs du méthane ;
- le deuxième groupe convertit ce qui est produit par le premier groupe en CO₂, H₂, acide acétique et des intermédiaires de fermentation : butyrates, propionates, éthanol. Cette partie de la fermentation est thermodynamiquement favorable à très faible concentration d'hydrogène, donc en association syntrophique avec des substances consommatrices d'hydrogène comme le méthane ;
- le troisième groupe inclut les archées méthanogènes. Les substrats sont l'acétate, le formate, le méthanol, les méthylamines, H₂ et CO₂.

Cela peut prendre des mois et des années avant que la population microbiologique s'établisse.

Combustion de la biomasse (8 %)

Lorsque la combustion est complète, le fait de brûler de la biomasse n'a pas d'impact climatique sur une échelle de temps comparable à celle de la croissance de la biomasse de remplacement. Le carbone piégé par assimilation chlorophyllienne durant la croissance de la plante est restitué sous forme de dioxyde de carbone selon la réaction :



C'est pourquoi l'usage de la biomasse comme combustible est considéré comme neutre pour des plantes à croissance rapide et en l'absence de phénomènes de déplacement de l'utilisation des sols. Cependant, la combustion est rarement complète et parfaite. La combustion incomplète produit du monoxyde de carbone CO, du méthane, des hydrocarbures, des particules de carbone, des composés soufrés...

Par exemple, la fabrication traditionnelle ou moderne du charbon de bois consiste à chauffer le bois à l'abri de l'oxygène, ce qui produit du méthane.

Les émissions mondiales de méthane dues à la combustion incomplète de la biomasse sont estimées à 47 Tg CH₄/an (tableau p. 90), soit 8 % du total des émissions. Cette estimation résulte d'une combinaison de modèles de végétation, de facteurs d'émission souvent déterminés en laboratoire et de données spatiales de zones de feux et de surfaces brûlées. L'évolution du monoxyde de carbone (un autre gaz-trace produit par la combustion incomplète de la biomasse) dans l'atmosphère australe au cours des derniers siècles suggère des émissions beaucoup plus importantes au XIX^e siècle, en raison probablement des pratiques agricoles et de l'usage anthropique dominant du combustible végétal. À l'échelle interannuelle, c'est-à-dire en englobant des périodes de plusieurs années, certaines variations dans le taux d'augmentation du méthane atmosphérique ont été attribuées aux variations de l'étendue et de l'intensité des feux de biomasse, comme les pics d'émissions des années 1998 et de 2002-2003.

La combustion incomplète de la biomasse est présente dans deux situations fréquentes : la culture sur brûlis et les incendies de forêts.

L'agriculture itinérante sur brûlis (essartage et écobuage) est encore pratiquée par un demi-milliard de paysans. Cela consiste à brûler les broussailles (notamment celles qui résultent de la mise en jachère) pour obtenir la pousse de prairies comestibles par le bétail, à restaurer la fertilité des sols grâce à la combustion lente de matériaux organiques [CIRAD, 2008], ou à défricher avant mise en culture. Durant la période de jachère, les herbes et broussailles poussent. Le feu nettoie la parcelle et permet de la remettre en culture. Durant la phase de brûlage à haute température avec flammes, la combustion est quasi complète. Durant la phase de combustion lente qui suit, la combustion est incomplète et du méthane est émis. La phase avec flammes dure quelques minutes tandis que la phase de combustion lente dure jusqu'à une heure et plus selon le type de végétation brûlé. Ce modèle agraire a été souvent critiqué depuis le sommet de Rio de Janeiro en 1992. Des recommandations de modification des pratiques culturelles et d'introduction d'engrais ont été émises sans que des financements soient associés à ces recommandations. La pratique de la culture sur brûlis est fréquente en Afrique, en Asie et en Amérique dans des systèmes agricoles et des biotopes très différents.

Toutefois, des études récentes effectuées au nord du Laos sur des parcelles de riz pluvial conduisent à la conclusion inverse : l'agriculture itinérante sur brûlis pratiquée sur les versants de forts dénivelés favoriserait le stockage du carbone par le sol. Par ailleurs, lors du brûlage, les souches sont laissées en place et les racines limitent l'érosion des sols superficiels riches en matériaux fins et en matières organiques, qui restent ainsi dans le sol au lieu de migrer vers les rivières, puis vers la mer. Il ne faut pas oublier que le sol sec est un puits de méthane. La savane africaine sèche est vraisemblablement un puits de méthane, même si elle est brûlée tous les trois ou quatre ans. Dans certaines régions, le brûlis est réalisé sous futaie pour conserver l'ombre.

Les incendies de forêts fonctionnent de la même façon. La période de flamme à haute température est une combustion complète ; elle dure de l'ordre d'une heure. La combustion lente dure ensuite une journée ou plus. Parfois, un vent violent fait redémarrer le feu après plusieurs jours. La forêt méditerranéenne, en particulier, a développé des espèces adaptées aux incendies qui surviennent plusieurs fois durant la vie de l'arbre. Les forêts tempérées et boréales ont toujours brûlé. Cependant, l'analyse des cinquante dernières années montre une augmentation des feux de forêts, notamment dans la zone boréale (Canada, Alaska, Scandinavie, Sibérie). En Sibérie, premier exportateur mondial de bois, la modification des pratiques d'exploitation et un manque de soin associé à la fin du système soviétique pourraient avoir autant d'impact sur les incendies que la température d'été ou le raccourcissement de la période d'enneigement. Des forêts sont brûlées délibérément afin de convertir le sol libéré en zones de cultures. L'évaluation de la différence entre les émissions de méthane de la zone forestière et les émissions après modification de l'usage ne peut être faite qu'au cas par cas.

Les raisons qui conduisent à protéger la forêt sont liées plus à la protection de la biodiversité et à la protection de la qualité des eaux qu'à la modification des émissions de méthane. Sans négliger l'aspect économique : le charbon de bois est utilisé comme combustible et carbone dans la fabrication de l'acier et de la fonte de qualité car il ne contient pas de soufre. Le Brésil est le premier producteur mondial de charbon de bois, dont la production est souvent artisanale.

Les sources géologiques (entre 2 et 10 %)

Du méthane peut être émis par suintement ou dégazage (*seepage*) dans les bassins sédimentaires marins ou terrestres et par émissions de type volcanique et géothermale. Une partie de ce méthane émis est fossile (dépourvu de carbone 14 et donc formé il y a plus de 50 000 ans), mais une autre partie peut être contemporaine et se former biologiquement dans les sédiments avant possible relargage dans l'atmosphère par bullage, au travers de la colonne d'eau. On l'appelle toutefois « géologique » car son transfert vers l'atmosphère implique un tel processus.

Les suintements dans les bassins sédimentaires sont généralement composés par du méthane (80-99 %) à basse température. Ces émissions se manifestent par différents phénomènes : volcans de boues continentaux, suintements à grande échelle dans certaines plaines (*onshore seeps*), microfuites continentales, ou macrofuites des fonds océaniques et des volcans de boues sous-marins.

Les émissions volcaniques et géothermales sont caractérisées par des gaz chauds comportant essentiellement du CO₂ et de l'eau où le méthane produit est soit thermogénique soit inorganique. En présence de zones magmatiques, on parlera d'émissions volcaniques ; en leur absence, on parlera d'émissions géothermales.

L'estimation de ces sources reste incertaine. Le tableau de la figure 7.1 donne le chiffre de 9 Tg/an (soit 2 % des émissions totales), mais un effort de synthèse au cours des dernières années a revalorisé les émissions moyennes entre 20 et 60 Tg/an

(soit entre 3 et 10 %). Les grandes réserves d'hydrates de méthane des marges continentales peuvent être en partie regroupées dans cette famille des sources géologiques. L'existence de courants de turbidités sur les talus continentaux ou la déstabilisation d'hydrates par un tremblement de terre constituent en effet des origines géologiques du méthane (lui-même souvent d'origine biologique) susceptible d'atteindre l'atmosphère. Ces phénomènes sont très mal quantifiés, mais pourraient aussi contribuer à hauteur de quelques Tg/an aux émissions atmosphériques. Les modalités d'une possible libération de méthane à partir de ce réservoir important ne font pas l'unanimité à ce jour au sein de la communauté scientifique. Il intéresse désormais les compagnies pétrolières à la recherche de nouvelles ressources énergétiques.

Les combustibles fossiles (17 %)

Du méthane est émis par l'exploitation du charbon, du pétrole et du gaz. C'est une émission de type géologique et fossile, mais due à l'activité humaine. Les émissions mondiales de méthane produites par les combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole) et par l'industrie sont estimées à 97 Tg/an, soit 17 % du total des émissions.

Le charbon (6 %)

Les mines de charbon sont exploitées depuis des siècles. Près de la moitié (44 % en 2010) de l'électricité mondiale est produite grâce à la combustion du charbon et sa croissance a été de 7 % en 2010. Les coups de grisou meurtriers, c'est-à-dire l'auto-inflammation accidentelle du méthane en forte concentration (il forme un mélange explosif avec l'air à des teneurs comprises entre 5 et 15 %), sont inscrits dans la culture des mineurs du monde entier.

Le méthane est produit durant le processus de constitution du charbon en fonction de la composition de la matière organique initiale et des conditions d'enfouissement de cette matière organique. On retrouve au départ les règles de fermentation anaérobie déjà décrites, suivies de pyrolyses à haute température et de migrations au travers des roches jusqu'à des couches imperméables. Le méthane ainsi généré ne peut trouver d'espace dans les filons de charbon et migre dans le massif rocheux. Lors du creusement de la mine, la pression de confinement dans le massif baisse, le méthane diffuse dans les fissures, qui s'élargissent, et s'échappe dans la mine ou dans l'atmosphère. Le relâchement des pressions de confinement peut aussi être provoqué par l'action de la tectonique (par exemple au Chili dans la zone de subduction). Le méthane sort par les puits de ventilation : de grandes quantités d'air sont introduites dans la mine pour maintenir le méthane à un taux inférieur à 0,5 %. Malgré le faible taux de méthane, les quantités relâchées sont importantes. Pour éviter la diffusion du méthane, des forages sont réalisés dans le massif afin de drainer le méthane. En Europe, ce méthane drainé est très généralement utilisé comme combustible. Aux États-Unis, le méthane est plutôt relâché dans l'atmosphère. Les Britanniques ont évalué que 40 % du méthane est relâché après avoir quitté la mine, par désorption durant l'ensemble du processus industriel.

Il n'y a que très peu de mesures permettant de chiffrer les émissions. Globalement, il n'y a pas de mesures pour les mines à ciel ouvert. Dans les mines, les mesures sont orientées vers la sécurité et non vers la réduction des émissions. Or, l'usage du charbon est croissant et va continuer à croître longtemps car c'est le combustible fossile avec les plus grosses réserves et le mieux réparti entre les continents. Il jouera durablement un rôle majeur dans le paysage énergétique planétaire. La consommation mondiale de charbon a atteint 7 900 millions de tonnes en 2015. La croissance de la consommation a diminué ces trois dernières années (5,4 % en 2011, 3 % en 2013, 0,4 % en 2014, stable en 2015) sans doute du fait du ralentissement économique en Asie.

La consommation de la Chine qui représente environ 50 % de la consommation mondiale s'est stabilisée tandis que la consommation de l'Inde et de l'Indonésie continue d'augmenter. La consommation aux États-Unis a diminué du fait de la concurrence des gaz de schiste, mais l'extraction est stable et est destinée à l'exportation.

Globalement, l'émission des mines de charbon de la planète représenterait de l'ordre de 36 Tg CH_4/an , soit 6 % du total des émissions. Elle a probablement augmenté depuis dix ans, mais le manque d'information sur l'exploitation du charbon dans certains pays émergents rend difficile la réduction des incertitudes.

Il existe en Chine, mais aussi probablement ailleurs, des niveaux de charbon dans le sol qui s'enflamment naturellement (foudre...), sans être liés à une exploitation de ce charbon. Les émissions correspondantes sont probablement majoritairement du CO_2 , mais comme la combustion est vraisemblablement incomplète, par manque d'oxygène, il doit aussi y avoir du CH_4 ...

Le gaz naturel (11 %, chiffre commun avec le pétrole et l'industrie chimique)

Le gaz naturel est essentiellement du méthane, donc toutes les fuites au cours du creusement des puits, de l'exploitation, du transport, du stockage et de la distribution contribuent aux émissions.

On distingue les émissions fugitives (vannes, soupapes...) et les émissions intermittentes provoquées par l'entretien et la maintenance (ce qui suppose de purger et vider les tuyaux). Des fuites apparaissent durant les opérations de forage des puits de façon plus ou moins contrôlée, durant l'extraction et durant les procédures de déshydratation, de séparation liquide/gaz, etc. Durant le transport, des fuites apparaissent dans les gazoducs, du fait de la corrosion ou de défauts de fabrication, de soudage, de matériaux. Les mouvements de sol (glissement de terrains, séismes, mouvements tectoniques) provoquent également des fuites.

Lorsque l'émission de méthane est concentrée, elle est généralement « torchée », c'est-à-dire transformée en CO_2 par combustion avec l'oxygène de l'air dans une torchère. Comme dans une gazinière, le méthane se transforme en CO_2 en produisant de la chaleur. On voit des torchères dans les raffineries de pétrole. Le principe est le suivant : le méthane termine toujours sa vie en CO_2 . Il est en effet souhaitable

de réduire au maximum la durée de vie du méthane dans l'atmosphère, puisqu'il est beaucoup plus actif que le CO₂.

Très approximativement, les émissions de l'industrie du gaz seraient comprises entre 30 et 60 Tg/an, du même ordre de grandeur que pour le charbon, et pour des parts équivalentes dans la consommation mondiale d'énergie (approximativement 120 MJ/an pour le gaz et 130 MJ/an pour le charbon). Aujourd'hui, la part des fuites serait faible, de l'ordre de quelques Tg/an. Il n'en a pas toujours été de même. En ex-URSS, on estime que dans les années 1980 les fuites depuis le vieux réseau de gazoducs pouvaient atteindre 31 à 45 Tg/an. Actuellement, au niveau mondial la partie *vented and flared* (émise dans l'atmosphère et torchée) émettrait de 15 à 30 Tg/an. En 2004, aux USA, il n'y a pratiquement pas de données relatives à ces émissions *vented and flared*, et surtout ne sont pas distinguées les quantités émises directement dans l'atmosphère et les quantités torchées, c'est-à-dire dont le méthane est transformé en CO₂ (ce qui évite l'effet de serre intense du méthane durant les 8 à 10 ans qui précèdent sa transformation atmosphérique en CO₂). Depuis 2009, l'*US Energy Information Administration* tient des statistiques précises des émissions de méthane selon leur type.

Les accidents comme celui du gisement de méthane Elgin en mer du Nord qui a débuté en 2012 produisent des émissions temporaires de grandes quantités de méthane. L'accident d'Elgin a été réparé en un temps record (accident le 25 mars, obturation du puits le 16 mai : durant cette période, les émissions étaient estimées à 200 000 m³ de méthane par jour.

Le 23 octobre 2015, en Californie, une fuite majeure a été constatée dans un réservoir souterrain de gaz naturel (méthane) situé près de Porter Ranch. Ce réservoir nommé Aliso Canyon appartient à la compagnie Southern California Gas. Ce type de réservoir permet de stocker le gaz transporté par gazoduc et d'ajuster l'offre et la demande de gaz de la ville de Los Angeles.

Des milliers de résidents ont été évacués à cause du risque d'explosion. Un trou de 20 centimètres de côté a été décelé dans la paroi du tubage qui équipe le puits à 900 mètres de profondeur. La pression considérable (200 bars) empêche une obturation directe. Un puits de secours a été foré jusqu'à 1500 mètres de profondeur pour décharger la pression du méthane. La Southern California Gas a annoncé le 11 février 2016 que la fuite était sous contrôle, près de quatre mois après l'apparition de la fuite. Le puits aurait relâché plus de 80 000 tonnes de méthane dans l'atmosphère, ce qui est catastrophique du point de vue climatique et aura des conséquences économiques considérables pour la Southern California Gas qui est soumise à des quotas d'émissions de GES.

Récemment, les exploitations de gaz de roche-mère ont été associées à des émissions supplémentaires de méthane à l'occasion de l'ensemble des phases d'exploration, d'exploitation et de transport de ce gaz. Les fuites de transport et d'exploitation sont les mêmes que les fuites de l'industrie conventionnelle du méthane, ce qui ne les justifie évidemment pas. En principe, ce n'est pas l'intérêt de l'industriel de perdre le gaz qui est sa raison d'être. Durant la phase d'exploration, il est vraisemblable que

des technologies pas encore totalement matures conduisent à des fuites de méthane supérieures à celles du gaz conventionnel.

Le pétrole (11 % chiffre commun avec le gaz et l'industrie)

Il n'y a peu de données concernant les émissions de méthane de l'industrie pétrolière. On les estime toutefois à quelques Tg/an dans les inventaires d'émission. Les torchères qui brûlent sur les champs pétroliers, sur les raffineries, sur les plates-formes *offshore* et les navires FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) sont la preuve qu'il y a du méthane émis et qu'il est transformé pour l'essentiel en CO₂.

Les pétroliers se préoccupent de façon croissante de ce méthane pour le réinjecter dans les puits et pallier la déplétion du gisement ou pour l'exploiter soit dans les turbines à gaz du site, soit dans des installations voisines.

Deux sources potentielles de méthane : le pergélisol des zones humides arctiques et les hydrates de méthane marins

Le pergélisol (*permafrost* en anglais) désigne un sol dont la température est en permanence en dessous de 0 °C au moins deux années de suite. Le pergélisol couvre 25 Mkm², soit un quart des surfaces émergées dans l'hémisphère Nord. Cette surface a atteint un maximum il y a environ 18 000 ans, à l'époque du dernier maximum glaciaire, et son minimum il y a 6 000 ans. Un minimum relatif est apparu durant le Moyen-Âge (« optimum climatique médiéval », X^e-XIV^e siècles). Les zones frontières du pergélisol, généralement vers le sud et l'ouest, ont donc déjà expérimenté des cycles longs de gel et dégel.

Le sol des régions de hautes latitudes, en particulier lorsque le climat est continental, subit des cycles thermiques annuels présentant des écarts importants. En cas de réchauffement par rapport à l'état climatique moyen, le pergélisol superficiel peut dégeler chaque année sur une épaisseur allant de quelques centimètres à quelques décimètres. L'eau superficielle est alors liquide et l'activité biologique et végétale se développe. La couche qui gèle et dégèle chaque année est appelée « couche active » ou « mollisol ». Dans les zones humides boréales, les émissions de méthane se produisent comme dans les autres zones humides. La production de méthane augmente lorsque la température superficielle augmente du fait de l'insolation et de la diminution de l'albédo du sol lorsque le couvert neigeux laisse place au sol sombre. Ceci est également vrai des sols dont la température moyenne est légèrement supérieure à 0 °C, mais qui gèlent profondément en hiver et dégèlent en été. La carte suivante (figure 7.3) montre la répartition du pergélisol sur l'ensemble des zones arctiques. Notons qu'il y a des pergélisols isolés dans les Alpes au-dessus de 2 500 mètres à l'ubac.

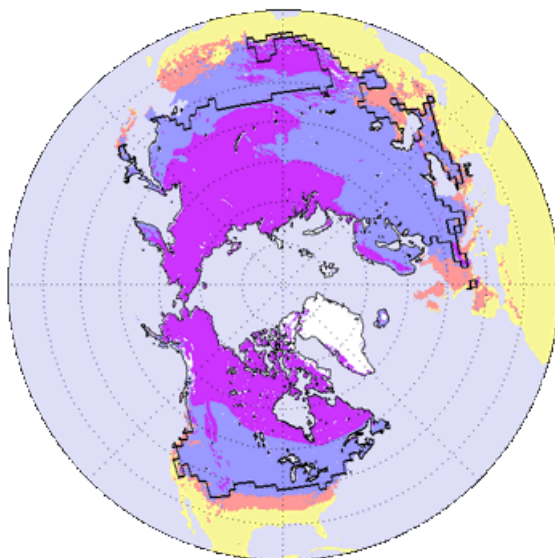
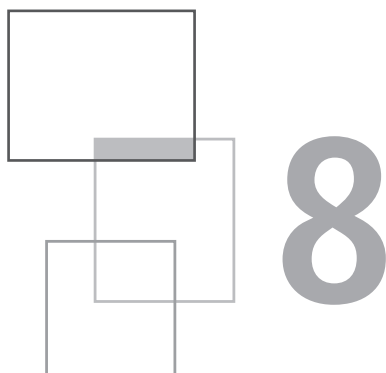


Figure 7.3 Répartition du pergélisol aux hautes latitudes nord (source NASA)
(les zones de pergélisol proprement dites sont en magenta)

Une augmentation progressive des durées de dégel et des températures du pergélisol le transformant en mollisol et potentiellement en zone humide conduirait à un accroissement des émissions de méthane provenant des zones humides en général. Ceci n'est pas constaté. C'est la tendance proposée par certains modèles. Le record de froid moderne aurait été battu le 11 décembre 2013 à $-93,2^{\circ}$ dans l'est de l'Antarctique. Ceci n'indique évidemment rien sur les tendances à long terme.

À ce phénomène progressif, peut s'en ajouter un autre : on peut s'attendre à ce que le réchauffement conduise à une déstabilisation des hydrates de méthane présents en grande profondeur tant dans les profondeurs océaniques que sous les terres émergées (plusieurs centaines de mètres en milieu terrestre) dans le pergélisol. Cependant, il règne une grande incertitude sur la constante du temps que prendra cette déstabilisation. Les premières zones susceptibles d'être affectées concernent les plateaux continentaux en marge de l'océan arctique, envahis par l'océan il y a environ 10 000 ans, lors de la dernière déglaciation. La surface du plateau continental, alors constituée de pergélisol, a subi un réchauffement important (probablement supérieur à 20°C). Mais l'effet du réchauffement sur la stabilité des hydrates se trouve contrecarré par l'augmentation de pression due à la montée du niveau de l'océan. On a récemment observé localement des émissions massives de méthane provenant de larges zones de débullage, de l'ordre du kilomètre de diamètre, dans les eaux du plateau sibérien oriental. Les concentrations locales de méthane y étaient multipliées par 100, laissant à penser que le phénomène indiqué ci-dessus prendrait place aujourd'hui. Mais, actuellement, ces zones d'émissions n'apparaissent pas sur les cartes de concentrations globales de méthane obtenues par satellites.

Une autre source potentielle d'émissions de méthane, cette fois-ci uniquement en milieu océanique, est susceptible de contribuer au bilan du méthane : les hydrates de méthane trouvés généralement sous des profondeurs d'eau excédant 500 mètres, c'est-à-dire là où la pression est suffisamment élevée pour qu'ils soient thermodynamiquement stables.



Méthane : les puits et les solutions d'atténuation

(Les chiffres entre parenthèses font toujours référence au tableau de la p. 92 mais cette fois en matière de destruction de méthane (total mondial estimé à 536 Tg CH₄/an).

Les principaux puits

Les sols (6 %)

Les sols sont la surface des terres émergées, soit 149,4 Mkm² (29,3 % de la surface de la planète). Si l'on en retire les 14,1 Mkm² de l'Antarctique, on retient 135 Mkm² parfois appelés « surface habitable ». Cette surface est très approximativement divisée en 1/3 pour les forêts, 1/3 pour les zones désertiques et 1/3 pour la culture et l'élevage.

Le *Giec* estime que, à l'échelle globale, les sols constituent un puits de méthane de 30 millions de tonnes par an (à 15 % près), ce qui représente 6 % du puits total de méthane.

Les sols contiennent des microorganismes qui peuvent soit produire du méthane (méthanogénèse), soit en consommer (méthanotrophie) et le transformer en composés organiques secondaires (dont le CO_2). La part relative de ces deux transformations dépend au premier ordre de la teneur en eau du sol. Dans un sol saturé en eau (zones humides, rizières), c'est la méthanogénèse qui l'emporte. Lorsque les matières organiques se décomposent dans les sols submergés ou détrempés, l'eau limite la circulation d'oxygène, ce qui permet l'apparition de zones anoxiques et provoque la libération de méthane. Que ce soit dans les forêts, les prairies ou les cultures, la clé du système est bien la teneur en eau du sol et, secondairement, sa température.

Contrairement aux zones humides et aux rizières qui émettent des quantités importantes de méthane, les sols en moyenne sont considérés comme des puits de méthane, soit qu'ils oxydent en CO_2 le méthane produit dans une couche inférieure, diminuant ainsi l'émission de méthane, soit qu'ils réagissent avec le méthane atmosphérique et l'absorbent.

Cependant, l'usage des sols peut avoir un fort impact sur le comportement du sol lui-même, qui peut agir comme puits ou comme émetteur. Le fait de transformer une forêt en zone agricole tend à augmenter la concentration en azote qui inhibe l'oxydation du méthane dans le sol, réduit le puits du méthane et peut même favoriser son émission. Ces changements sont non symétriques : transformer une terre arable en forêt ou en prairie permet de stocker 25 tonnes de carbone par hectare en 100 ans ; transformer une prairie en sol arable déstocke 25 tonnes par hectare en 100 ans, transformer une forêt en sol arable c'est environ 30 tonnes par hectare et par an qui est déstocké. Une bonne part de ce déstockage se fait par émission de méthane.

Comme déjà évoqué dans le cas des rizières, le drainage des sols a aussi un fort impact sur le comportement des sols.

Le méthane est également détruit dans les sols sous l'action de bactéries méthanotrophes (20-30 tonnes de méthane par ha et par an... C'est énorme comparé aux 25 tonnes de déstockage en 100 ans cités plus haut !). Enfin, une perte par réaction avec le chlore dans la couche limite marine et dans les eaux superficielles des océans est suspectée, mais encore relativement incertaine. Les estimations du puits total planétaire de méthane varient entre 480 et 610 Tg/an.

Par l'action du zooplancton et du phytoplancton, le carbone organique apporté par le délavage des sols organiques et par le plancton mort, les feuilles et les branches est piégé dans les sédiments où se préparent les hydrocarbures du futur. La masse organique contenue dans les sédiments lacustres serait ainsi supérieure à la masse organique de la totalité des forêts. Dans les forêts, le sol est fréquemment un puits de méthane car les racines, par leur aspiration, rabattent la nappe et désaturent le sol superficiel, ce qui est favorable au développement de bactéries méthanotrophes et à l'oxygénation du sol. Par contre, lors des périodes de pluies ou de crues, le sol se sature, les bactéries méthanogènes se développent et le sol émet du méthane. Si l'épaisseur d'eau augmente, le méthane n'est plus émis en totalité car tout ou partie du méthane produit est oxydé au cours de sa remontée vers la surface.

L'atmosphère (94 %)

Le méthane est détruit dans l'atmosphère par plusieurs processus. Le principal puits de CH_4 est dû à sa réaction avec le radical hydroxyle OH dans la troposphère (450-550 Tg/an) et dans la stratosphère (10-50 Tg/an) pour former du CO_2 . Ce puits détruit 90 % du méthane émis chaque année. La quantité de radical OH dans l'atmosphère détermine sa capacité oxydante ; Ce radical est connu pour être l'agent nettoyant de la basse atmosphère et plus précisément de ses polluants gazeux (CO , NO_x et les différents composés organiques volatils).

OH est essentiellement produit par photolyse de l'ozone puis par réaction de l'oxygène atomique produit dans un état excité avec la vapeur d'eau. La concentration moyenne globale du radical OH dans la troposphère est de 106 molécules/cm³, avec des fluctuations de plusieurs ordres de grandeurs autour de cette valeur moyenne à cause du rayonnement disponible, de l'ozone, de la vapeur d'eau, des composés carbonés, du rapport NO_x/CO ... On trouve les plus fortes concentrations du radical OH dans la troposphère tropicale le jour en été, et les plus faibles aux hautes latitudes la nuit en hiver. Le méthane est ainsi détruit aux altitudes moyennes de la troposphère, entre les deux tropiques. S'il est possible de mesurer directement les concentrations d'OH, la représentativité de ces observations reste très faible à cause de la courte durée de vie de OH (de l'ordre d'une seconde).

Pourtant, la connaissance d'OH est essentielle pour équilibrer les cycles de nombreux gaz de l'atmosphère, dont le méthane. L'utilisation de composés dont on connaît bien les émissions et qui n'ont qu'une seule réaction de destruction avec OH (comme le méthyl-chloroforme, MCF, CH_3CCl_3) permet de déterminer les concentrations du radical OH et leurs évolutions à grande échelle. L'utilisation de modèles de chimie atmosphérique permet de calculer les concentrations du radical OH qui est au cœur des chaînes réactionnelles de l'atmosphère. Ces deux approches sont complémentaires et s'accordent assez bien pour représenter la variabilité interannuelle de OH (< 5 %) pour les années 2000, mais pas pour les décennies précédentes pour lesquelles la méthode utilisant le MCF surestime la variabilité de OH à cause d'une trop grande sensibilité aux émissions de MCF. La valeur moyenne de OH est encore incertaine (connue à ± 30 %), difficile à atteindre au regard de la courte durée de vie de ce radical.

Il semble qu'OH ait augmenté de 60 % au cours du dernier siècle. Les prévisions pour le futur, dans un climat plus chaud et plus humide, devraient conduire à une croissance des concentrations de OH. L'évolution de la concentration de méthane dépendra des sources et des puits qui, l'un comme l'autre, dépendent du changement climatique, mais les différents modèles conduisent plutôt à une diminution de la durée de vie du méthane au cours du XXI^e siècle.

Évolution passée, présente et future du méthane dans l'atmosphère

Reconstruction et interprétation des variations paléoclimatiques

Les carottes de glace constituent la seule archive disponible pour reconstruire la composition chimique précise de l'atmosphère sur le dernier million d'années. L'analyse des bulles d'air piégées dans la glace permet en particulier de reconstituer l'historique de la concentration de CO₂, CH₄ et N₂O dans l'atmosphère, trois gaz à effet de serre qui influencent la température de la terre. Ces mesures simultanées avec d'autres indicateurs du climat sont d'un intérêt capital pour mieux comprendre le rôle de ces trois gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique.

Variation pendant l'Holocène

Au cours de cette période interglaciaire, qui couvre les 10 000 dernières années, au cours de laquelle l'homme moderne a toujours vécu, il est intéressant de constater que le climat a changé de façon non négligeable, bien que très inférieure aux variations rencontrées sur les échelles plus longues discutées dans la section précédente. Les concentrations de méthane ont varié jusqu'à 15 % au cours de l'Holocène pour un changement de température globale de ± 1 °C (figure 8.1). En s'appuyant sur une quantification des variations du gradient interpolaire de méthane sur cette période de temps, Chappellaz *et al.* [1997] ont proposé que la variation du cycle hydrologique aux basses latitudes soit le processus de contrôle dominant de l'évolution du méthane durant la première moitié de l'Holocène. En revanche, ces auteurs attribuent l'augmentation des 5 000 dernières années à une expansion massive des marécages et des tourbières boréales. Le gradient interpolaire plus réduit sur la période étudiée la plus récente (le dernier millénaire) conduit les mêmes auteurs à invoquer l'effet des émissions de CH₄ d'origine anthropique (culture de riz, élevage). Cette hypothèse a été reprise avec un argumentaire plus poussé par un chercheur américain [Ruddiman, 2003] qui invoque plus largement un impact anthropique significatif sur le cycle de CH₄, mais aussi de CO₂ dès le milieu de l'Holocène (soit depuis 7000 ans). Si cette hypothèse semble de moins en moins plausible à la lueur d'analyses isotopiques du CO₂ dans la glace [Elsig *et al.*, 2009], elle n'a pas encore été réfutée pour le cas du méthane. Les analyses isotopiques de CH₄ conduites par Sowers [2010] suggèrent toutefois qu'une contribution croissante des marécages boréaux durant l'Holocène expliquerait l'essentiel de la tendance d'évolution de la concentration du méthane dans l'atmosphère et de ses rapports isotopiques.

Variations des concentrations en méthane de l'atmosphère depuis la période industrielle

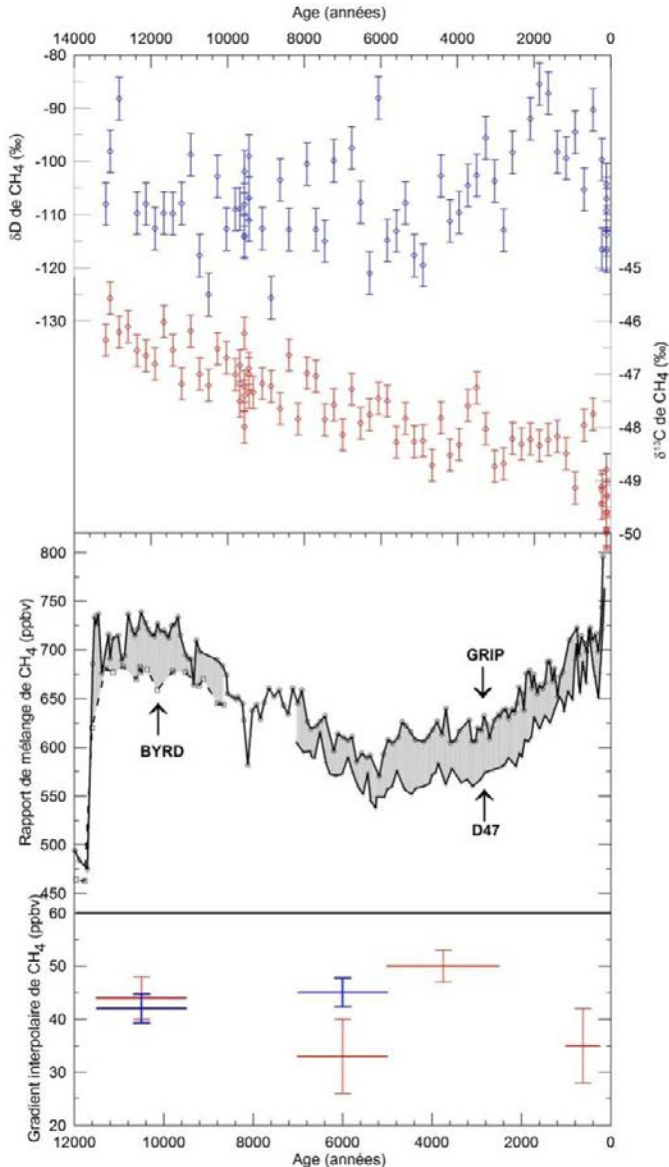


Figure 8.1 Variation de la concentration du CH_4 pendant l'Holocène (au centre, en noir ; GRIP est relatif au Groenland tandis que D47 et BYRD sont relatifs à l'Antarctique), ainsi que du gradient interpolatoire (en bas, selon deux études), et (en haut) des rapports isotopiques DIH (en bleu) et $^{13}C/^{12}C$ (en rouge). D'après Chappellaz et al. (1997), Brook et al., (1999), et Sowers (2010).

L'évolution spectaculaire du méthane au cours du dernier millénaire (en particulier sur les deux derniers siècles), avec une augmentation de ~1100 ppbv (partie par milliards en volume) accompagnée d'une augmentation du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ d'environ 2 ‰ et de 15 ‰ pour le rapport D/H (deuterium/hydrogène). Ces trois augmentations reflètent l'apport considérable de nouvelles sources anthropiques : culture du riz, élevage de ruminants, décharges, feux de végétation, extraction et distribution du gaz et du charbon.

Durant la période s'étendant des années 1000 à 1800, on observe de faibles fluctuations du méthane, de l'ordre de 50 ppbv (Figure 8.2). Elles semblent correspondre grossièrement aux périodes de l'optimum médiéval et du petit âge de glace. Des mesures récentes de l'évolution du monoxyde de carbone et de ses isotopes, grâce aux carottes de glace, suggèrent que l'évolution de l'intensité et de la fréquence des feux de végétation constituerait un facteur déterminant de contrôle de cette variabilité naturelle sur le dernier millénaire.

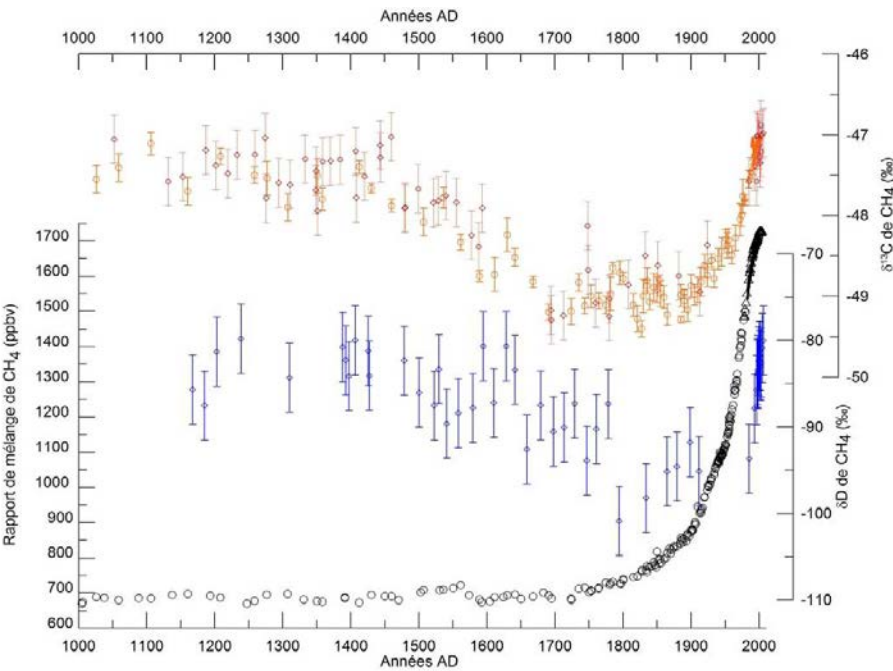


Figure 8.2 Variation de la concentration du CH_4 au cours du dernier millénaire (en noir) ainsi que des rapports isotopiques D/H (en bleu) et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (en rouge et orange). D'après MacFarling Meure et al. [2006], Ferretti et al. [2005] et Mischler et al. [2009].

Rétro-actions climatiques sur le cycle du méthane et évolution future

On a vu précédemment que les sources de méthane atmosphérique sont à la fois d'origine naturelle et anthropique. Voyons maintenant comment le changement climatique peut venir modifier les sources naturelles de méthane et, dans le futur, sa durée de vie dans l'atmosphère. Les zones humides, le pergélisol et les sédiments marins sont en effet susceptibles de répondre au réchauffement climatique et de générer une augmentation des émissions de méthane. Le méthane étant un puissant gaz à effet de serre, ses émissions peuvent venir accélérer le changement climatique, ce qui constitue une rétroaction climatique dont il convient d'estimer l'importance. Par ailleurs, le pouvoir oxydant de l'atmosphère va aussi répondre au changement climatique, via une modification des émissions naturelles et anthropiques de gaz réactifs (NO_x, composés organiques volatils ou COV) ou une augmentation des températures et de l'humidité. Cette modification du pouvoir oxydant de l'atmosphère a un impact direct sur la durée de vie du méthane et donc sur ses concentrations atmosphériques.

Zones humides

La manière dont les émissions des zones humides vont répondre au changement climatique futur résultera à la fois des changements dans l'étendue des zones humides, qui dépend de l'effet combiné des changements de température et de précipitation, et de l'augmentation de température, qui sera plus importante dans les hautes latitudes. Le dégel du pergélisol peut venir modifier l'étendue des zones humides, cet aspect des processus étant discuté plus loin. On peut aussi souligner que le dépôt d'espèces soufrées peut avoir un impact sur les émissions de méthane car certaines bactéries ont une forte affinité avec l'hydrogène et l'acétate, deux éléments nécessaires à la méthanogénèse. Le dépôt d'espèces soufrées correspond à ce qu'on appelle en langage courant les pluies acides qui peuvent être d'origines anthropiques ou volcaniques. On pense donc que les pluies acides générées par l'utilisation de combustibles fossiles (charbon et pétrole principalement contenant du soufre) ont causé une réduction des émissions de CH₄ dans les zones humides où ces dépôts ont eu lieu. Dans un futur plus ou moins rapproché, les dépôts acides vont sans doute diminuer dans les régions du globe où elles ne diminuent pas déjà, en raison des politiques d'amélioration de la qualité de l'air, ce qui impliquera alors une augmentation probable des émissions de méthane.

Diverses études ont estimé l'augmentation des émissions de méthane due au changement climatique à partir de modèles de climat couplés à une représentation simplifiée des zones humides et des émissions de méthane qui y sont associées. Des études montrent une augmentation des émissions de 10 à 35 % par °C de réchauffement. Cette rétroaction ajoute une augmentation supplémentaire de température pour la fin du XXI^e siècle qui varie de 1 à 8 % selon les modèles et les scénarios considérés.

Pergélisol continental

Les quantités de carbone stockées dans les régions de pergélisol atteignent 1672 Gt C, répartis entre 277 Gt C pour les tourbières gelées, 407 Gt C dans la yedoma sibérienne, 747 Gt C dans les autres sols et 241 Gt C dans les sédiments alluviaux des grands deltas. Cette estimation inclut le carbone qui se trouve sous le pergélisol. Il est remarquable que certains pergélisols datent de plus de 700 000 ans, ce qui implique que le pergélisol a survécu à plusieurs cycles glaciaire-interglaciaires, y compris à des périodes prolongées plus chaudes que le climat actuel, comme le dernier interglaciaire il y a 125 000 ans. Les processus qui peuvent déstabiliser et dégeler le pergélisol peuvent être graduels, comme un approfondissement de la couche active (On appelle couche active la région du sol qui gèle et dégèle avec le cycle saisonnier de température) et la formation de taliks (Les taliks sont des couches de sol intermédiaires toujours décongelées, mais situées entre du pergélisol permanent en dessous et une couche active au-dessus).

Ils peuvent aussi être plus soudains, comme le thermokarst (Le thermokarst désigne le processus d'effondrement du sol quand il y a dégel d'une grande quantité de glace, qui peut donner lieu à la formation de lacs, mais aussi à la vidange de lacs existants).

Ils peuvent enfin être la conséquence des feux... La question reste néanmoins posée de l'évolution du pergélisol dans des climats plus chauds, comme dans ceux attendus si le réchauffement climatique atteint des températures bien supérieures à celles prévues aujourd'hui.

L'approfondissement de la couche active peut résulter d'un dégel plus long et plus intense pendant l'été et d'un regel plus court et moins intense pendant l'hiver. Ce processus est modulé par une éventuelle augmentation de l'humidité du sol qui conduit à une augmentation de la capacité thermique du sol, mais aussi à une augmentation de sa conductivité thermique et donc du couplage avec l'atmosphère. Les autres processus à considérer sont l'augmentation de la couverture neigeuse qui isole le sol et l'empêche de regeler, la croissance de la végétation qui modifie l'humidité du sol de manière différente selon les types de végétation (arbustes ou mousses) et le dégagement de chaleur qui provient de la décomposition bactérienne de la matière organique. Le réchauffement peut conduire à des zones de taliks⁸. Les taliks sont le siège de décomposition de la matière organique et de production de CH₄. Au final, c'est l'humidité du sol et la fraction de pergélisol dégelé inondé qui sont les paramètres clés déterminants, selon que la décomposition du carbone contenu dans le pergélisol aura lieu de manière aérobie (production de CO₂) ou anaérobie (production de CH₄). Si le méthane diffuse dans le sol jusqu'à un niveau où l'oxygène est présent, il peut y être oxydé par les bactéries méthanotrophes avant d'atteindre l'atmosphère. Néanmoins, s'il est produit en grande quantité, le méthane peut aussi s'échapper sous forme de bulles. Une situation de sécheresse peut aussi déclencher

8. Le talik est une couche non gelée, même en hiver à l'intérieur, au-dessus ou au-dessous d'une zone de pergélisol. Exemple : le dessous du lit d'une rivière.

des feux qui émettent à la fois du CO_2 et des quantités appréciables de CH_4 , mais conduisent à diminuer le stock de carbone susceptible d'émettre du méthane par la suite.

Au final, il est donc très difficile de quantifier la quantité de méthane qui proviendra du dégel du pergélisol. Seules quelques études ont cherché à établir des estimations globales.

Les hydrates de méthane marins

Les clathrates sont des composés cristallins où les atomes forment une cage capable de piéger des molécules à l'intérieur. On parle d'hydrate de méthane quand la cage est composée de molécules d'eau et que le gaz piégé est du méthane. Dans les hydrates de méthane naturels, le gaz peut être d'origine biogénique (dans la majorité des cas), volcanique ou thermogénique (produit de manière non biologique à partir de la matière organique soumise à une haute température). Les hydrates sont généralement associés à la présence de pergélisol profond ou aux marges sédimentaires à des profondeurs excédant 500 mètres, c'est-à-dire là où la pression est suffisamment élevée pour que les clathrates soient thermodynamiquement stables.

Il est légitime de se demander comment les changements de pression et de température au fond des océans que l'on attend du fait du réchauffement climatique sont de nature à déstabiliser les hydrates de méthane présents dans les sédiments. En eau peu profonde, un réchauffement peut déstabiliser les hydrates à la fois par le dessus et le dessous, alors qu'en eau profonde la déstabilisation ne peut arriver que par le dessous de la couche de stabilité. Compte tenu des constantes de temps associées au réchauffement de l'océan profond et de la diffusion de chaleur dans les sédiments (plusieurs milliers d'années), nous ne nous préoccupons ici que des hydrates de méthane situés dans les zones côtières, et en particulier dans l'océan arctique dont on sait qu'il se réchauffe rapidement. Les mécanismes de déstabilisation des hydrates sont compliqués et peuvent se manifester au travers de cheminées de méthane si les hydrates sont déstabilisés par en dessous ou des glissements de terre sous-marins. Il est à noter que les dégazages de méthane qui ont été observés dans l'océan arctique ne sont pas nécessairement, et sans doute pas du tout, d'origine anthropique. Les fonds marins des zones côtières étaient en contact avec l'atmosphère et la glace lors du dernier maximum glaciaire du fait de la réduction du niveau de la mer à cette époque. Ces fonds marins continuent de se réchauffer du simple fait qu'ils sont maintenant en contact avec l'eau de l'océan dont la température est beaucoup plus élevée que la température à laquelle ils étaient soumis lors du dernier maximum glaciaire. La perturbation anthropique reste encore minime. Toutefois, le réchauffement attendu de l'Océan arctique est de nature à déséquilibrer une partie des hydrates, sur des constantes de temps qui restent mal évaluées.

Il est possible de conclure que le réchauffement climatique peut conduire à la déstabilisation d'une partie des hydrates de méthane présents dans les sédiments et dans le pergélisol. Pour la majorité des hydrates, les constantes de temps sont de l'ordre de plusieurs millénaires. Pour certaines régions côtières, les constantes de temps sont plus courtes, mais mal évaluées. On ne connaît pas la fraction de méthane émise

au fond de l'océan qui entrerait dans l'atmosphère suite à une déstabilisation. Elle dépendra essentiellement de la capacité du filtre bactérien à l'interface eau-sédiment et de la colonne d'eau à oxyder rapidement ce méthane pour le rendre au cycle du carbone océanique.

Équivalence « carbone » du méthane : protocole de Kyoto et politiques de changement climatique

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) autres que le dioxyde de carbone est très intéressante car elle permet de réduire la facture des politiques climatiques de 30 à 40 %. Pour ce faire, un poids est attribué à chaque GES par comparaison avec le dioxyde de carbone. Cela permet d'établir une équivalence entre les différents GES en vue de traiter globalement leur réduction.

Le protocole de Kyoto reste, à l'heure actuelle, le seul accord international de réduction des émissions de GES. Le méthane fait partie du panier de six GES couvert par ce protocole. Les totaux d'émissions et les objectifs de réduction y sont fixés par pays en termes de tonnes équivalent CO_2 , libre ensuite aux pays signataires de répartir leur effort sur les différents GES comme ils l'entendent. C'est le pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans, sur lequel nous reviendrons, qui est utilisé pour fixer les équivalences. Le méthane étant un GES plus actif sur l'effet de serre que le CO_2 , une réduction d'émission de 1 tonne de CH_4 équivaut donc à une réduction d'émission de 25 tonnes de CO_2 ⁹.

Évolutions en cours au sein des sources et puits de méthane

Évolutions dans les sols en général

On a vu que les sols interviennent comme stock de carbone au sens large et comme puits de méthane. La modification des usages du sol et notamment la déforestation jouent un rôle important dans le comportement du sol qui peut être émetteur ou puits selon les conditions, essentiellement hydriques et de température.

Les zones désertiques participent peu au stock de carbone et aux échanges de méthane. Cependant, ces surfaces désertiques s'accroissent. Le CIRAD (Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement)

9. Le pouvoir de réchauffement global à 100 ans pour le méthane a été estimé à 21 dans le second rapport d'évaluation du *Giec* (valeur utilisée par le protocole de Kyoto et dans le système européen d'échange de permis d'émissions), puis réévalué par le *Giec* à 23 dans le troisième rapport d'évaluation et à 25 dans le quatrième rapport d'évaluation (Forster *et al.*, 2007).

estime que 50 Mkm² sont menacés de désertification. Cela conduirait à une diminution des émissions de méthane. La sécheresse en Asie est l'une des explications retenues pour expliquer la décroissance de la concentration en méthane de l'atmosphère après 2000. Cette explication laisse entendre qu'un épisode de sécheresse dans une région du monde modifierait les émissions de méthane d'un ordre de grandeur équivalant à la variation des émissions anthropiques.

En matière de forêts, de nombreuses recherches montrent que « le déboisement entraîne généralement la perte presque totale de la biomasse et une perte de carbone du sol de 40 à 50 % en l'espace de quelques décennies, dont la moitié se produit en moins de 5 ans, sous forme d'émissions de CO₂ (et/ou de méthane). Dans le cas de déboisement suivi par la mise en place d'une prairie, les études isotopiques de carbone montrent le remplacement relativement rapide de la réserve de carbone originelle de la forêt par des composés du carbone dérivés de la prairie. Avec le boisement, le carbone de la surface du sol et le carbone du sous-sol augmentent, mais lentement, selon le taux de croissance des arbres »¹⁰.

La plupart des études relatives à l'évaluation des changements de stocks de carbone dans les sols ne discutent pas des conséquences sur le méthane. La forêt a des comportements très variés selon le niveau de la nappe, plus ou moins profonde, et même selon la submersion sur plusieurs mètres de profondeur, durant les épisodes pluvieux ou les crues, comme s'est par exemple le cas pour l'Amazone et l'Iénisseï. Malgré le manque de mesures, il est très vraisemblable qu'une forêt sèche est un puits de méthane et qu'une forêt humide est émettrice de méthane.

Des mesures atmosphériques au-dessus des grandes zones forestières de la planète, et selon les épisodes secs et humides, seraient donc d'un grand intérêt pour tenter de prévoir l'évolution du comportement « méthane » des forêts.

Dans les zones de culture, le comportement « méthane » des sols dépend des pratiques culturelles utilisées. L'étude de la FAO déjà citée indique qu'un labour profond peut diminuer la teneur en carbone organique de 10 à 30 %. La tendance aujourd'hui est de diminuer les profondeurs de labour, ou de ne plus labourer. Notons toutefois que ce choix n'est pas dicté par le souci de diminuer les émissions de méthane, mais pour améliorer l'efficacité du travail de la terre. En France, l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et le CIRAD mènent de nombreuses recherches dans ces domaines, à Madagascar, au Brésil, au Laos, au Kenya, etc. Ces études comparent non seulement le labour traditionnel, plus ou moins profond, mais aussi la jachère traditionnelle et la culture par semis direct sur couverture végétale (permanente ou avec écobuage). L'érosion des sols est souvent le premier problème à résoudre. Cependant, la question du stock de carbone et la question « puits ou source de méthane » devraient être partie intégrante de ces recherches.

10. « La séquestration du carbone dans le sol », FAO, Arrouays et Pelissier, 1994, Neil *et al.*, 1998.

Il manque aussi de mesures atmosphériques au-dessus des grandes zones de culture ou d'élevage, selon les épisodes secs et humides, qui seraient d'un grand intérêt pour tenter de prévoir l'évolution du comportement « méthane » de ces zones en fonction de l'évolution du climat (température et saturation des sols), zone par zone.

Beaucoup de recherches agronomiques se donnent pour objectif l'amélioration de la qualité, de la constance, de la résistance au stress hydrique de la production pour assurer des ressources alimentaires régulières. Beaucoup des modifications recommandées à la suite de ces recherches conduisent de fait à diminuer les émissions de méthane, ce qui n'est pas surprenant puisque la production du méthane détourne une part de l'énergie disponible qui n'est plus disponible pour la production agricole. La diminution des émissions de méthane n'est pas l'objectif, mais le résultat de la recherche d'efficacité agricole.

Une synthèse des recherches en cours a été présentée aux rencontres de l'INRA en février 2011. Elles montrent en particulier que les prairies constituent des puits nets pour le CO₂ (comparables aux forêts) et que des pratiques d'élevage peu intensives diminuent les émissions de N₂O et de CH₄. Ainsi la quantité de carbone stockée par la prairie compenserait la quantité de méthane émise par les animaux valorisant cette prairie.

Évolutions dans les zones humides

On a vu que l'ensemble des zones humides constitue le plus gros émetteur de méthane de notre planète, celui dont la capacité d'émission présente les plus fortes variations, en fonction principalement de l'hydrologie et de la température. C'est donc l'émetteur qui interagit le plus avec les variations climatiques. La réflexion sur les émissions des zones humides est couplée avec la réflexion sur le comportement des sols présentée au paragraphe précédent.

Le fait de drainer les sols humides a un impact direct sur le comportement « méthane » des sols. Le désir d'augmenter les surfaces cultivables encourage le drainage des sols. Rappelons que l'assèchement de la mer d'Aral a été en grande partie provoqué par une surirrigation des plaines cotonnières d'Ouzbékistan associée à un drainage très insuffisant des sols. Il y a toute raison de penser que ces grandes étendues saturées d'eau ont été émettrices de méthane. Un drainage efficace du sol peut au contraire permettre simultanément d'améliorer la production, de diminuer la consommation d'eau et de diminuer les émissions de méthane. Inversement, certains pays cherchent à reconstituer des zones humides drainées dans le passé afin de protéger ou développer la biodiversité riche des zones humides.

Le cas particulier des rizières

Comme déjà indiqué, ce n'est pas le riz qui est émetteur de méthane, mais la pratique culturale par immersion temporaire (figure 8.3).



Figure 8.3 *Exemple de culture de riz en terrasse noyées en gravitaire lors des pluies (photo B. Tardieu)*

À Madagascar, en Afrique, en Asie du sud-est, la culture du riz pluvial en milieu sec (en particulier sur les hauts plateaux) atteint des rendements satisfaisants¹¹. Si la culture du riz noyé durant une période de l'année s'est autant développée ailleurs, c'est qu'elle présente certains avantages pour les paysans, en particulier l'élimination des mauvaises herbes et la culture sans aucun moyen mécanique. Des recherches sont menées essentiellement pour stabiliser la production du riz et développer des méthodes culturales efficaces en particulier vis-à-vis des sécheresses et des maladies. L'objectif premier n'est pas de diminuer les émissions de méthane. Cependant, la fabrication et l'émission de méthane consomment de l'énergie qui n'est plus disponible pour la production agricole. Il est donc vraisemblable que l'amélioration des pratiques culturales ira dans le sens d'une réduction des émissions de méthane.

Évolutions au sein des décharges

Les solutions techniques existent non seulement pour éviter d'émettre du méthane, mais aussi pour le récupérer et l'utiliser comme source d'énergie. Ceci est devenu la règle en Europe. La tendance est la même, avec retard, aux USA et au Canada.

11. Par exemple, l'impact d'un système de culture à base de riz pluvial et de semis direct sur couverture végétale avec référence particulière aux effets sur la production de riz. La photo est prise à Sumatra (Indonésie).

Dans les pays émergents en particulier, des crédits « carbone » peuvent être attribués dans le cadre des mécanismes de développement propre (*Clean Development Mechanisms* – CDM) pour l'élimination de ces décharges (Figure 8.4).



Figure 8.4 Sur la rive du fleuve Ikoupa à Antananarivo (Madagascar) (photo B. Tardieu)

Évolutions en matière de combustion incomplète de la biomasse, le charbon de bois

Contrairement à ce qui est fait avec la méthode traditionnelle, il est possible de produire du charbon de bois en collectant et en utilisant le méthane produit.

Le méthane collecté peut être utilisé pour produire de la vapeur et faire tourner une turbine à vapeur, dans un moteur diesel adapté au gaz pauvre ou torché afin de transformer aussi complètement que possible le méthane en CO_2 . Dans l'immédiat, compte tenu du prix de l'électricité, du prix du charbon de bois et du prix du carbone, l'opération ne se justifie pas économiquement, mais la technologie est bien au point.

Évolutions en matière d'animaux d'élevage

La digestion des ruminants

Des recherches ont été entreprises dans plusieurs pays du monde afin de réduire les émissions du bétail, et en particulier du cheptel bovin et ovin, portant essentiellement sur la nourriture de ce cheptel. La question posée est différente selon qu'il s'agisse d'élevage hors sol ou d'animaux pâturent en prairies naturelles ou artificielles.

La fermentation des excréments, fumiers et lisiers

Lorsque les animaux sont élevés en prairie, leurs excréments participent à l'entretien des sols et à leur régénération.

Lorsque les animaux sont élevés hors sol, les excréments, fumiers et lisiers peuvent être récupérés. Il s'agit de matières organiques valorisables. Il n'y a pas de problèmes techniques pour valoriser ces matières comme engrais ou comme source de méthane. La « méthanisation à la ferme » est une technique qui permet de capter les émissions naturelles de méthane de ces matières hautement fermentescibles et de produire une énergie renouvelable de façon décentralisée. L'équipement nécessaire est cependant important en termes d'investissement et pousse à une recherche d'optimisation économique en incorporant massivement d'autres substrats organiques, qu'ils soient produits sur la ferme (déchets végétaux ou surtout cultures énergétiques – de maïs – comme en Allemagne) ou collectés à proximité (déchets verts, déchets des industries alimentaires...). La question fondamentale est donc la rentabilité de l'entreprise. La collecte, la fermentation et la récupération du gaz doivent être organisées avec des tarifs adaptés de rachat de l'électricité produite par cogénération.

Dans les pays émergents et dans le cadre des mécanismes de développement propre, un projet de 7 MW a été développé dans le sud de l'Inde et a donné lieu à 20 000 CER (*Certified Emission Reduction*). La situation n'étant pas la même dans les pays développés et dans les pays émergents, l'investigation doit être menée plus loin avant d'établir des recommandations.

Évolutions en matière de combustibles fossiles

Le charbon

Le charbon est exploité de façon différente selon les sites. Les contraintes concernant les émissions de méthane sont très variables selon les pays. Nous avons vu qu'il est possible et financièrement accessible de drainer le méthane et de l'exploiter ou, lorsque les émissions sont faibles et irrégulières, de le torcher de façon à transformer totalement le méthane en CO₂.

Il semble inévitable que des réglementations imposent à l'échelle planétaire des règles contraignantes pour les émissions de méthane. En co-bénéfice, le drainage et la collecte du méthane diminuent considérablement les risques d'explosion dans les mines, encore fréquentes aujourd'hui dans certains pays.

Le gaz naturel

Le gaz naturel est constitué essentiellement de méthane. Par conséquent, toutes les fuites, purges et tous les dégazages libèrent du méthane.

Une bonne partie de ce gaz émis pourrait ne pas l'être. Aujourd'hui, l'incitation à ne pas perdre ce gaz est faible puisque son coût est en grande partie associé à son coût de transport. Une perte de gaz près du puits n'a pas beaucoup de valeur

économique. Éviter cette fuite n'est donc pas rentable si l'on ne donne pas une valeur (négative) au gaz émis dans l'atmosphère.

Comme pour le charbon, mais de manière probablement moins coûteuse, on devra recourir à des mesures réglementaires internationales pour inciter les producteurs à la vertu climatique. Il faudra ensuite faire appliquer ces règlements.

Le pétrole

Le GGFR (*Global Gas Flaring Reduction*¹²) a lancé des projets de réduction du torchage dans huit pays et la majorité des partenaires du GGFR ont approuvé une norme mondiale pour la réduction des gaz torchés. Le partenariat offre son assistance à l'Algérie, au Cameroun, à la Guinée équatoriale, au Kazakhstan, au Nigeria et au Qatar afin de leur permettre d'atteindre un niveau d'émission nul ou minime d'ici certaines dates butoirs.

Entre 2005 et 2012, les quantités de méthane torchées ont diminué de 20 % pour l'ensemble de la planète. L'objectif de la Banque mondiale est d'éliminer le torchage de routine en 2030.

Le premier moyen de réduire le torchage du gaz naturel est de ne pas le produire, en améliorant les conditions de gestion, au cas par cas ; ces conditions sont fréquemment associées à l'écoulement diphasique des hydrocarbures :

- à Farmington (Nouveau-Mexique), sur un puits à gaz présentant une quantité variable de condensats, une meilleure gestion a permis d'éviter les mises à l'air ou mises à la torche intempestives par un meilleur pilotage des surpressions ;
- sur le site de Kokdumalak (Ouzbekistan) un meilleur pilotage du débit d'huile a permis de réduire la quantité de gaz associé extraite, améliorant ainsi le pourcentage de récupération et la durée de vie du puits.

C'est le volume et la composition du gaz associé qui vont orienter son emploi. Si le gaz est disponible en grandes quantités, il va justifier financièrement d'installer une usine de purification et un gazoduc, éventuellement en cumulant la production de plusieurs puits voisins.

Si les quantités de gaz associé sont insuffisantes pour le vendre, on peut envisager les emplois suivants :

- réinjection dans le gisement : cette méthode est classiquement utilisée dans le cadre de la récupération assistée du pétrole ; elle permet de maintenir une pression de fond plus élevée, et donc d'améliorer le pourcentage de récupération du pétrole — ce qui rend l'opération rentable ; cependant, si le gaz est acide (présence de CO₂ ou d'H₂S), il exige des matériels et canalisations résistants à la corrosion. Du point de vue de l'exploitant, ce gaz n'est pas perdu : il est simplement stocké et reste disponible à l'exploitation quand le puits aura épuisé son liquide ;

12. Partenariat mondial pour la réduction des gaz torchés (création à Johannesburg, 2002).

- génération d'énergie *in situ* : le gaz non traité alimente une turbine génératrice d'électricité pour les besoins du site de production ;
- craquage du gaz naturel pour production de méthanol : cette méthode aboutit à un produit de grande consommation facile à transporter, mais exige des unités de craquage de petite taille, encore rares.

Les zones arctiques et leurs évolutions à long terme

On a vu que des émissions massives de méthane ont été observées récemment dans les eaux du plateau sibérien oriental, qui laissent penser que les estimations antérieures étaient très sous-estimées. On a également vu qu'il est très difficile de quantifier tant la quantité de méthane qui proviendra du dégel du pergélisol que la durée ou l'ampleur de ces émissions. Il en est de même pour les hydrates de méthane marins.

Le problème est qu'on n'a pas trouvé de remède pour limiter ces émissions. Le seul conseil actuellement est de multiplier les observations dans les régions arctiques pour quantifier les risques qui pourraient en résulter.

Une action importante est aussi entreprise pour faire prendre en compte ces phénomènes dans les modèles de climat océan-atmosphère-biosphère, ce qui est rendu difficile par la complexité des interactions entre climat, humidité des sols, couverture neigeuse et présence du pergélisol. C'est encore, à l'évidence, l'une des limitations dans la modélisation actuelle du système terre qu'il convient de réduire le plus rapidement possible.

Recommandations de type méthodologique

À partir des différentes évolutions en cours décrites *supra*, un certain nombre de recommandations de type méthodologique ou métrologique peuvent être formulées, visant à permettre de mieux comprendre l'évolution des émissions de méthane et donc de proposer ensuite des actions concrètes de réduction sur une base mieux informée du point de vue scientifique.

- **Forêts** : réaliser des mesures régulières de la composition de l'atmosphère au-dessus des grandes zones forestières de la planète, selon les épisodes secs et humides, afin de comprendre et de prévoir l'évolution du comportement « méthane » des forêts.
- **Zones agricoles** : réaliser des mesures régulières de la composition de l'atmosphère au-dessus des grandes zones agricoles (cultures et prairies) selon les épisodes secs et humides, à modéliser zone par zone en fonction de l'évolution du climat local (température et saturation en eau des sols).
- **Zones humides naturelles arctiques** : intensifier les recherches sur les zones arctiques où le dégel du sol est de plus en plus prolongé, afin de comprendre et de prévoir l'évolution des émissions de méthane à venir.

- **Culture du riz** : encourager l'étude et l'amélioration des pratiques culturales, permettant non seulement de sécuriser les récoltes et la santé, mais encore de réduire les émissions de méthane grâce à un moindre usage de l'engrais.
- **Charbon de bois** : la technologie de récupération du méthane étant opérationnelle, mais la faisabilité économique n'étant pas assurée, il paraît raisonnable d'attendre soit des progrès de productivité, soit des changements du contexte économique (prix du carbone, notamment).
- **Digestion des ruminants** : poursuivre les recherches pour maîtriser la grande complexité des interactions entre limitation des émissions de méthane, préservation de la santé animale et humaine, viabilité économique et écologique.

Actions à mettre en œuvre à court terme « sans regret »

Les actions recommandées ci-dessous sont dites « sans regret » car elles ont prouvé leur utilité et leur pertinence par l'expérience dans différents pays et qu'on ne leur a pas trouvé d'effets secondaires négatifs.

- **Zones humides** : dans les zones agricoles présentes et à venir, soutenir les actions de drainage – sans altérer la biodiversité protégée par les accords de Ramsar (« convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau » traité international adopté le 2 février 1971 à Ramsar en Iran – car le drainage peut permettre simultanément d'améliorer la production agricole, de diminuer la consommation d'eau et de diminuer les émissions de méthane.
- **Décharges** : dans les pays en développement : encourager l'utilisation des crédits carbone dans le cadre des mécanismes de développement propre, pour développer la récupération du méthane, tout en mobilisant des moyens de transition « sociale » pour ne pas pénaliser les populations vivant au voisinage des décharges ; dans les pays développés : faire le point actualisé et quantifié des émissions résiduelles de méthane et procéder à la mesure réelle du rendement de la captation du méthane.
- **Fumiers et lisiers** : poursuivre le développement des technologies de récupération du méthane, en s'appuyant sur les mécanismes de développement propre et les crédits carbone, tant dans les pays développés que dans les pays émergents, en s'adaptant aux contextes économiques et écologiques différents.
- **Termites** : poursuivre sans hésitation la lutte anti-termites, car il ne semble pas y avoir d'inconvénient à leur limitation, alors que les dégâts qu'ils provoquent dans le bâti de tous les pays sont considérables. La lutte contre les termites n'est pas guidée par la réduction des émissions de méthane, mais par le coût socio-économique des dégradations causées.
- **Mines et centrales à charbon** : améliorer le cadre réglementaire international pour limiter les émissions de méthane, d'autant plus que le drainage et la collecte

du méthane diminuent considérablement les risques d'explosion dans les mines, encore fréquentes aujourd'hui dans certains pays.

- **Gaz** : améliorer le cadre réglementaire international, comme pour le charbon, mais de façon probablement moins coûteuse et, en parallèle, donner de la valeur au gaz lâché dans l'atmosphère, afin d'inciter les pollueurs à réduire leurs émissions.
- **Pétrole** : soutenir l'action des pays et des entreprises membres du GGFR pour réduire au maximum les gaz torchés.

Conclusions

L'exploitation de l'énergie fossile est associée à l'émission de méthane dans l'atmosphère. La quantité de méthane émis augmente rapidement avec l'augmentation de la consommation. Nous devons nous préparer à une vie décarbonée, mais pour les prochaines décennies, c'est encore l'augmentation de la consommation de combustibles fossiles qui dominera la tendance. Si cette exploitation émet inévitablement du CO₂, les émissions de méthane ne sont ni nécessaires ni mêmes utiles. Elles sont en grande partie évitables à un coût parfaitement compatible avec les économies de ces combustibles. Il est évident que c'est en priorité dans ces domaines qu'il faut faire porter les efforts. Certains industriels soucieux de leur responsabilité et de leur réputation le font déjà en grande partie. Établir des règles communes et les faire respecter va dans le sens de l'équité et de la solidarité planétaire.

La question des zones humides et, plus globalement des sols, est de première importance et représente un grand enjeu. Les variations des émissions de méthane au cours des siècles ont été fortes et le plus souvent associées aux variations du climat qu'elles ont pu amplifier. Il s'agit là de rétroactions difficiles à contrôler, et il convient donc d'éviter autant que faire se peut de « lancer la machine » ! Dans cet esprit, et bien que ce soient les zones tropicales qui émettent actuellement le plus de méthane, les zones boréales sont à suivre avec beaucoup d'attention et de prudence, car il convient là encore d'éviter de « lancer la machine » par des mesures d'exploitation du méthane stocké (pergélisols et clathrates marins).

D'une façon générale, le rôle du méthane comme gaz à effet de serre est très important et doit être davantage pris en compte, mais son coefficient d'équivalence avec le CO₂ est très dépendant de l'échelle de temps à laquelle on se place. Un horizon temporel de 100 ans a été choisi comme norme dans le cadre du protocole de Kyoto. À cet égard, le fait de changer sans précaution ce coefficient d'équivalence pour pouvoir parler, notamment au niveau des négociations internationales, de tonnes équivalent CO₂, modifierait fortement l'équilibre des politiques comparées des différents pays ayant ratifié le protocole de Kyoto et pourrait s'avérer contre-productif.

Références pour le méthane

- Bogner et al., Chapter 10, IPCC WGIII, (2007).
- Boone, D.R., Biological formation and consumption of methane, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
- Bousquet, Ph., Transport atmosphérique et inversion des sources et puits de gaz à effet de serre. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 2007.
- Bousquet, P., Hauglustaine, D.,A., Peylin, P., Carouge, C., Ciais, P., 2005. Two decades of OH Variability as inferred by an inversion of atmospheric transport and chemistry of methyl chloroform. Atmospheric Chemistry and Physics 5, 2635-2656.
- Brockberg, G., Termites as a source of atmospheric methane, disponible à www.iitap.iastate.edu 1996.
- Chaplot V., Podwojewski P., Phachomphon K., Valentin C., Spatial variability and controlling factors of soil organic carbon under steep slopes of the tropics, Soil Science Society of America Journal, 2008.
- CIRAD, Symposium « Soil Carbon Sequestration » 2008.
- Coe, 1998 [cité by Matthews in Khalil (ED)].
- Conen F., Smith, K.A., Yagi, K., 2010 Methane from rice cultivation. In : D. Reay et al. (eds.) Methane and Climate Change. Earthscan, London, UK, pp. 115-135.
- Engle, D., Melack J.M. (2000) Methane emissions from an Amazon floodplain lake : Enhanced release during episodic mixing and during falling water. Biogeochemistry, 51, 71-90.
- Fraser et al., 1983.
- Fuller, D.Q., J. van Etten, K. Manning, C. Castillo, E. Kingwell-Banham, A. Weisskopf, L. Qin, Y.I. Sato et R.J. Hijmans, The contribution of rice agriculture and livestock pastoralism to prehistoric methane levels : An archaeological assessment. Holocene 21 (5), 743-759, 2011.
- INRA Rencontres INRA 25 février 2011 au Salon international de l'Agriculture.
- IRD Institut de Recherche pour le Développement (voir Poss R.).
- Jamali, H., S.J. Livesley, T.Z. Dawes, L.B. Hutley et S.K. Arndt, Termite mound emissions of CH₄ and CO₂ are primarily determined by seasonal changes in termite biomass and behavior. Oecologia, 167 (2), 525-534, 2011.
- Johnson, D.E., K.A. Johnson, G.M. Ward and M.E. Branine, Ruminants and other Animals, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
- Joyce, J., and Jewell P. W., Physical Controls on Methane Ebullition from Reservoirs and Lakes Environmental & Engineering Geoscience, May 2003, v. 9, p. 167-178.

- Keller, M., Mitre, M.E., and Stallard, R.F., 1990, Consumption of atmospheric methane in soils of central Panama : Effects of agricultural development : *Global Biogeochemical Cycles*, v. 4, no. 1, p. 21-27.
- Keller, M., and Stallard, R.F., 1994, Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama : *Journal of Geophysical Research*, v. 99, no. D4, p. 8307-8319.
- Khalil, M.A.K., et M.J. Shearer, Sources of methane, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Kirchgessner, D.A., Fossil Fuel Industries, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Lamarque, J.-F., Hess, P., Emmons, L., Buja, L., Washington, W., Granier, C., 2005. Tropospheric ozone evolution between 1890 and 1990. *Journal of Geophysical Research* 110, D08304. Doi : 10.1029/2004JD005537.
- Laos IRD Gregory Flechet Fiche d'actualité scientifique n° 307 octobre 2008.
- Lelieveld J., Peterss, W., Dentener, F., Krol, M.C., 2002. Stability of tropospheric hydroxyl chemistry. *Journal of Geophysical Research* 107 (D23), 4715.
- Levine, J.S., W.R. Cofer III et J.P. Pinto, Biomass Burning, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Levitt, MD., J.K. Furne, M. Kuskowski et J. Ruddy, Stability of human methanogenic flora over 35 years and a review of insights obtained from breath methane measurements. *Clinical Gastroenterology and Hepatology* 4 (2), 123-129, 2006.
- Lawrence, M.G., P. Jöckel et R. von Kuhlmann, What does the global mean OH concentration tell us ? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1, 37-49, 2001.
- Marani, L., et P.C. Alvala, Methane emissions from lakes and flood plains in Pantanal, Brazil.
- Mastepanov, M., C. Sigsgaard, E.J. Dlugokencky, S. Houweling, L. Strom, M.P. Tamstorf et T.R. Christensen, Large tundra methane burst during onset of freezing, *Nature* 456, 628-631, 2008.
- Melack J.M., and Engle, D.L., (2010) An organic carbon budget for an Amazon floodplain lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, in press. McCord, S., J. Walker, and ...
- Montzka et al., 2011.
- Matthews, E., Wetlands, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000
- Neue, H.U., et P.A. Roger, Ice Agriculture : Factors controlling emissions, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Poss R., Barbiero L., Bernoux M., Blanchart E., Brauman A., Chaplot V., Grimaldi M., Grünberger O., Monga O., Ruellan A., Dossier thématique de l'IRD « Les sols, des milieux très fragiles », 2011.

- Rasmussen, R.A. et M.A.K. Khalil, Global production of methane by termites, *Nature* 301, 700-702, 1983.
- Reshetnikov, A.I., N.N. Paramonova et A.A. Shashkov, An evaluation of historical methane emissions from the Soviet gas industry. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D3), 3517-3529, 2000.
- Romanovskii, N.N., H.W. Hubberten, A.V. Gavrilov, A.A. Eliseeva et G.S. Tipenko, Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas. *Geo-Marine Letters*, 25 (2-3), 167-182, 2005.
- Seiler et al., 1983.
- Shakova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Kosmach D., and Belheva N., 2007. Methane release on the Arctic East Siberian shelf. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 01071.
- Shakova, N., Semiletov, I., Salyuk A. and Kosmach, D., 2008. Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf : Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates ? EGU General Assembly 2008, *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-01526.
- Shearer, M.J., et M.A.K. Khalil, Rice Agriculture : Emissions, in. Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Simmonds, P.G., A.J. Manning, R.G. Derwent, P. Ciais, M. Ramonet, V. Kazan et D. Ryall, A burning question. Can recent growth rate anomalies in the greenhouse gases be attributed to large-scale biomass burning events ? *Atmospheric Environment*, 39 (14), 2513-2517, 2005.
- Simpson, I.J., F.S. Rowland, S. Meinardi et D.R. Blake, Influence of biomass burning during recent fluctuations in the slow growth of global tropospheric methane. *Geophysical Research Letters*, 33 (22), L22808, doi 10.1029/2006GL027330, 2006.
- Sugimoto, A., T. Inoue, N. Kirtibutr et T. Abe, Methane oxidation by termite mounds estimated by the carbon isotopic composition of methane, *Global Biogeochemical Cycles*, 12 (4), 595-605, 1998.
- Thorneloe, S.A., M.A. Barlaz, R. Peer, L.C. Huff, L. Davis et J. Mangino, Waste Management, in. Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
- Wang, Z., J. Chappellaz, K. Park et J.E. Mak, Large variations in southern hemisphere biomass burning during the last 650 years. *Science*, 330, 1663-1666, 2010.
- Whiticar, M.J., Methane fluxes, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.



La géo-ingénierie du climat

(Olivier Boucher et Jean-Claude André)

Au-delà des méthodes d'atténuation et d'adaptation qui sont discutées dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, et qui ont été abordées en détail dans ce qui précède, la géo-ingénierie tient une place particulière en ce sens que ses actions délibérées concernent le plus souvent l'échelle globale. La géo-ingénierie rassemble des propositions où, très souvent, la technologie est un point de passage obligé, même si elle laisse la place aussi à des pratiques (par exemple culturelles) avec relativement peu de technologie¹³.

La géo-ingénierie, dont certaines propositions ne vont pas sans poser d'importants problèmes scientifiques, technologiques et éthiques, se distingue de l'atténuation et de l'adaptation, même si les frontières peuvent parfois rester un peu vagues (figure 9.1). Il est à noter que la géo-ingénierie n'a pas été abordée lors des débats de la COP21 ni, bien sûr, mentionnée dans l'accord de Paris. Il n'en reste pas moins que les débats que la géo-ingénierie suscite depuis plusieurs années, tant dans la littérature scientifique que dans la grande presse, justifie d'en traiter ici.

13. Ce chapitre s'appuie largement sur le rapport de synthèse et les conclusions de l'atelier de réflexion prospective « Réflexion autour de la géo-ingénierie de l'environnement » financé par l'ANR (Boucher *et al.*, 2014b ; de Guillebon *et al.*, 2014).

Contexte

On peut identifier deux « âges d'or » de la géo-ingénierie dans la littérature scientifique : i) la guerre froide, pendant laquelle la géo-ingénierie est envisagée comme une opportunité, belligérante ou positiviste (voir les travaux du Russe Mikhaïl Ivanovitch Boudyko Михаил Иванович Будыко (Mikhaïl Ivanovitch Boudyko) à l'heure où l'Homme réalise l'impact qu'il peut avoir sur le climat (cf. l'« hiver nucléaire ») ; ii) la période en cours, débutant au milieu des années 2000, au moment où se multiplient les difficultés à maintenir les émissions de gaz à effet de serre (GES) à un niveau qui garantirait un réchauffement climatique global moyen inférieur à 2 °C (avec en particulier l'article de P. Crutzen en 2006). Il est d'ailleurs intéressant de noter ici que le fait que l'accord de Paris plaide pour se rapprocher autant que possible d'un réchauffement global de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle signifierait pour certains, de façon « subliminale », un recours à la géo-ingénierie.

On distingue parmi les propositions deux grandes catégories de méthodes de géo-ingénierie : SRM (pour “Solar Radiation Management”, gestion du rayonnement solaire) et CDR (pour “Carbon Dioxide Removal”, techniques de captation du dioxyde de carbone). Plusieurs auteurs ont néanmoins appelé à plus de granularité dans la définition du concept, car il existe un spectre de technologies aux conséquences, aux risques et à l'acceptabilité très variables (figure 9.2).

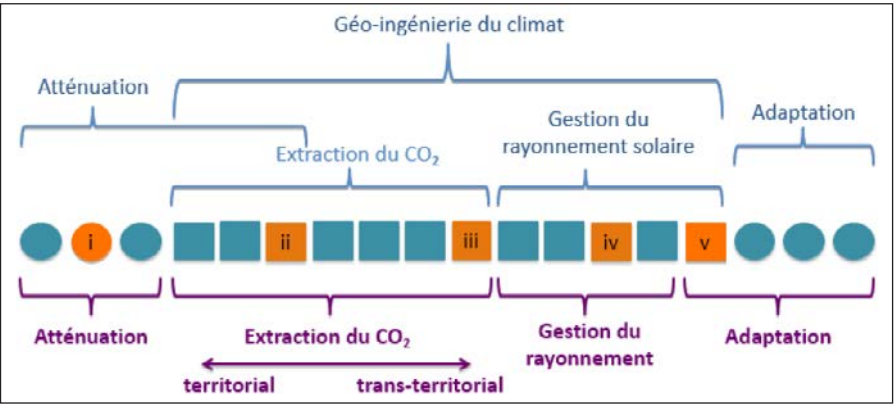


Figure 9.1 Nouvelle classification (en violet) des techniques de géo-ingénierie du climat dans le contexte des réponses possibles au changement climatique. Les carrés représentent les techniques ou pratiques qui sont généralement classifiées comme relevant de la géo-ingénierie du climat, alors que les cercles représentent les autres approches. Les exemples en orange incluent (i) le développement des énergies renouvelables, (ii) l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie couplée au captage du CO₂, (iii) la fertilisation des océans par des nutriments comme le fer, (iv) l'injection d'aérosols stratosphériques, et (v) le blanchiment des toitures. Adapté de Boucher et al. (2014a).

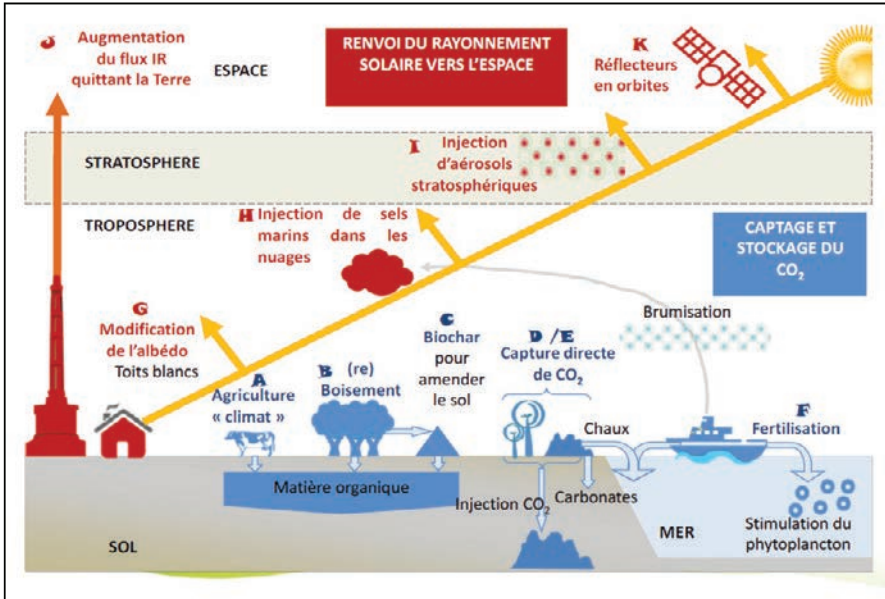


Figure 9.2 Les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. La figure ci-dessus présente les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. Les voies de captation et de stockage du CO₂ atmosphérique (en bleu) sont différenciées des voies de gestion de l'équilibre radiatif de la planète, en particulier via le rayonnement solaire (en rouge). D'après de Guillebon et al. (2014).

Les méthodes et technologies de gestion du rayonnement solaire (SRM)

Ces méthodes et technologies n'ont pas pour objectif de diminuer la quantité de GES présente dans l'atmosphère, mais de lutter contre leurs effets, principalement le réchauffement et certains impacts directement associés au réchauffement (comme les vagues de chaleur ou certaines situations de précipitations extrêmes). Il est très important de noter deux points cruciaux à ce stade. Tout d'abord, la gestion du rayonnement solaire ne conduit pas à réduire la quantité des GES présents dans l'atmosphère : elle s'attaque aux effets et non pas à la cause du changement climatique. Elle n'a donc pas d'effet sur une partie des conséquences de cette augmentation comme, entre autres, l'acidification des océans (on rappelle que ce terme désigne la réduction du caractère « basique » de l'océan, avec un pH diminuant au-dessous de sa valeur actuelle moyenne égale à environ 8, et sans bien entendu atteindre des valeurs « acides » inférieures à 7). L'autre point concerne le caractère relativement rapide des effets attendus d'une telle gestion, le contrôle du réchauffement pouvant se manifester sur des durées assez courtes, se mesurant en années (et non pas en

décennies comme dans le cas des méthodes d'extraction du carbone atmosphérique (cf. *infra*).

Un climat régulé par de telles technologies de gestion du rayonnement solaire connaîtrait néanmoins des changements climatiques résiduels assez forts à l'échelle régionale, en particulier en termes de possibles changements des régimes de précipitations. En effet, et en admettant que ceci soit possible, si la gestion était calibrée de façon à annihiler totalement le réchauffement général, il s'ensuivrait une réduction sensible du cycle hydrologique global. Cette réduction globale se traduirait de façon différenciée selon les grandes régions géographiques avec, par exemple, une réduction probablement importante du régime des moussons. On peut noter que certains partisans comme Keith (2013) de la géo-ingénierie par SRM contournent cette difficulté en arguant de la possibilité de contrôler le niveau d'intervention de telle façon que les phénomènes hydrologiques ne soient pas (trop ?) perturbés.

Une autre question cruciale concerne la possibilité d'un « rattrapage climatique » rapide si, les concentrations en GES continuant d'augmenter, le SRM venait à être stoppé après un certain temps (par exemple pour des raisons de gouvernance). Dans ce cas, la modélisation climatique montre que le système, encore plus lourdement chargé en GES, tendrait à retrouver très rapidement l'état correspondant à ces nouvelles concentrations, et ce à un rythme de 5 à 10 fois plus rapide que son rythme d'évolution en l'absence de SRM. Un tel « rebond » présenterait des risques significatifs pour de nombreux systèmes, naturels et anthropiques, incapables de suivre un tel rythme de réchauffement.

Néanmoins, et malgré ces réserves, un certain nombre de propositions ont été avancées (cf. Fig. 1) :

- les réflecteurs spatiaux, à mettre en place au point de Lagrange L1 afin de renvoyer une petite fraction de l'énergie solaire, tels que proposés par le physicien R. Angel, sont parfois évoqués comme une possibilité. Toutefois leur déploiement n'a pas été étudié en détail, sans doute en raison du faible degré de réalisme de cette technologie, compliquée par le caractère instable des points de Lagrange. Ceci est confirmé par un rapport du Cnes réalisé dans le cadre du projet REAGIR (Benedetti-Doumic et Martin, 2014) ;
- l'injection stratosphérique d'aérosols soufrés, ou de précurseurs d'aérosols, est sans doute la méthode qui, sans être souhaitable, semble la plus plausible du point de vue technologique. De façon imagée, il s'agit de reproduire artificiellement l'effet des éruptions volcaniques majeures, durant lesquelles d'importantes quantités d'aérosols sont injectées dans la stratosphère, conduisant à un refroidissement de quelques dixièmes de degré pendant leur temps de séjour. Les technologies d'injection d'aérosols soufrés n'existent pas, mais semblent pouvoir être développées à peu de frais¹⁴, au moins de manière assez « rustique ». L'injection

14. Keith (2013) mentionne un coût de 1 \$ pour déposer 1 kg d'aérosols dans la stratosphère, soit sur cette base 10 G\$ pour injecter les 10 Mt d'aérosols correspondant à une éruption majeure comme celle du Pinatubo.

devrait être continue et réalisée en plusieurs points du globe préférentiellement situés dans la bande tropicale, de manière à maximiser l'impact de l'injection. Un pilotage fin des injections, des distributions et des effets radiatifs induits n'est sans doute pas critique, compte-tenu de la circulation stratosphérique et de la dynamique climatique. Le corollaire est que les modifications climatiques induites par l'injection d'aérosols stratosphériques sont relativement peu pilotables au-delà de la modulation de l'équilibre radiatif global. Des variantes consistent à injecter d'autres types d'aérosols plus efficaces ou à plus longue durée de vie que les sulfates. Les effets « secondaires » sur la physico-chimie de la stratosphère, en particulier sur l'équilibre de l'ozone, restent toutefois encore mal connus ;

- l'ensemencement troposphérique, pour augmenter la couverture des nuages bas à fort pouvoir réflecteur, a également été proposé pour les nuages maritimes. Les effets climatiques sont encore moins bien maîtrisés que dans le cas de l'injection stratosphérique, tant en termes de microphysique des nuages que de maîtrise des contrastes entre terre et océans. Les technologies ne sont pas si simples, et impliquent la pulvérisation de grosses quantités d'eau de mer qui contiennent des impuretés, et un refroidissement évaporatif des aérosols de sels marins injectés qui font retomber la masse d'air ;
- une autre solution consisterait à augmenter l'albédo des surfaces. On peut différencier ici les surfaces maritimes (où une augmentation de la réflectivité par microbulles apparaît peu réaliste) des surfaces continentales où une augmentation plus locale peut s'apparenter à des techniques d'adaptation (cultures plus réfléchissantes, bâtiments peints en blanc).

Les méthodes et technologies d'extraction du carbone de l'atmosphère (CDR)

Ces méthodes, techniques et technologies, ont pour objectif de s'attaquer à la cause première du changement climatique en réduisant la quantité de GES présente dans l'atmosphère. Chaque tonne de GES captée dans l'atmosphère correspond ainsi à une réduction des émissions de la même quantité. La captation doit bien entendu être accompagnée d'une transformation ou d'une séquestration du GES capté. Si en principe ces techniques ou technologies peuvent concerner n'importe quel gaz à effet de serre de longue durée de vie, dans la pratique, seules des techniques concernant le dioxyde de carbone ont véritablement été considérées jusque-là. Comme déjà mentionné (cf. *supra*), ces méthodes sont caractérisées par des temps d'action longs, qui se mesurent en décennies, avant que les effets ne commencent à se faire sentir. Elles ont de ce point de vue des temps d'action assez proches de ceux liés à la réduction des émissions, un autre facteur qui permet de considérer certaines d'entre elles comme des compléments aux technologies d'atténuation (cf. Fig. 1). Plusieurs méthodes ont été proposées :

- l'extraction de CO₂ via la biosphère terrestre : reforestation, afforestation, stockage accru dans les sols via des modifications de techniques agricoles et culturales...

- le stockage de carbone dans les sols via un « bio-charbon » obtenu par pyrolyse de la biomasse cultivée. Il s'agit de fait d'une variante des méthodes précédentes. La durée de stockage de tels bio-charbons n'est toutefois pas connue de façon très précise ;
- l'extraction via la biosphère marine. Certaines zones océaniques pourraient en effet voir leur richesse en phytoplancton être augmentée par apport de fertilisants, tels le fer. Ce surplus de productivité primaire, s'il parvient à être capté ou exporté dans les sédiments, agit alors comme un nouveau puits de dioxyde de carbone atmosphérique. Des expériences de tels enrichissements océaniques ont été menées, avec toutefois des résultats très variables : la chaîne « phytoplancton – zooplancton – animaux supérieurs » est en effet très complexe, et de nombreux effets secondaires ne peuvent être maîtrisés dans l'état actuel des connaissances de biologie marine. Ces expériences font actuellement l'objet d'un quasi-moratoire ;
- l'extraction géologique en faisant réagir le CO₂ atmosphérique sur des roches. Il faut compenser la faible réactivité chimique de ces roches par leur broyage en quantités importantes. De plus, il faut neutraliser le CO₂ capté ou accepter une modification de la composition chimique de l'océan si le carbone est stocké sous forme de carbonates ;
- la captation atmosphérique par des voies chimiques. Si les technologies sont identifiées (adsorption sur des solides, absorption par des solutions plus ou moins alcalines (CaO, NaOH... — avec ou sans catalyseur...), la forte dilution du dioxyde de carbone atmosphérique rend néanmoins cette méthode peu efficace, en dehors évidemment de la captation à la source sur les sites émetteurs (centrales, cimenteries, aciéries...). Ces technologies focalisent une certaine activité de recherches, en particulier à l'étranger, dans la mesure où i) elles pourraient bénéficier à d'autres procédés industriels liés au dioxyde de carbone et ii) elles pourraient devenir économiquement viables dans des scénarios présentant des ruptures technologiques importantes quant à la production d'énergie décarbonée de bon marché.

Il est nécessaire de bien différencier les techniques appliquées à l'échelle d'un territoire particulier de celles qui le sont de façon transterritoriale, avec des conséquences et des effets secondaires. Il est assez souvent difficile d'évaluer le potentiel de certaines techniques ou technologies. Des problèmes de changement d'échelle (scalabilité) se posent en termes de stockage géologique du CO₂ et en termes économiques, énergétiques, de recyclage des nutriments (méthodes biomasse) ou des solvants (méthodes chimiques).

Questions scientifiques et éthiques, quelques recommandations

Le concept même de géo-ingénierie est lourd d'enjeux, de valeurs et de représentations, si bien que distinguer la géo-ingénierie de ce qui n'en est pas revient souvent

à se prononcer sur ce qui est souhaitable et acceptable. Il est donc recommandé de se référer autant que possible aux sous-catégories des méthodes habituellement envisagées plutôt que d'utiliser le terme générique.

Il faut distinguer entre les technologies irréalistes (miroirs spatiaux) ou inefficaces à l'échelle du problème climatique (augmentation de l'albédo des surfaces), les technologies dangereuses car susceptibles de déclencher des effets secondaires ou des rétroactions de portées inconnues (ensemencement océanique ou atmosphérique), et les technologies qui pourront être des aides à la réduction des émissions de GES (certaines techniques CDR, même si elles ne sont pas en situation de résoudre entièrement le problème).

La nécessité de poursuivre la recherche s'impose sur la plupart des techniques envisagées. Au-delà des études spécifiques sur telle ou telle technique, il est nécessaire de maintenir et développer en France une expertise sur l'ensemble des sujets de la géo-ingénierie.

Dans tous les cas se pose aussi, et de façon cruciale, le problème de la gouvernance à mettre en place. Il est important que la communauté de recherche/développement entre en dialogue avec la société civile de façon ouverte à toutes les sensibilités éthiques. Doivent être prises en compte les limites et les risques de ces technologies, évitant ainsi qu'elles ne puissent être vues comme des solutions miracles, prétexte à l'inaction en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. La réflexion sur la géo-ingénierie ne doit en effet pas faire oublier que le meilleur moyen de lutter contre le changement climatique reste de réduire les émissions !

Les techniques de gestion du rayonnement solaire (SRM)

Étant données les incertitudes importantes sur certaines techniques de gestion du rayonnement solaire, il semble que la recherche technologique dans ce domaine ne doive pas être la priorité. Toute recherche technologique dans ce domaine doit être faite avec une approche systémique très marquée où l'évaluation de l'efficacité et des risques, les considérations éthiques et les contingences politiques et économiques sont traitées de manière approfondie. Cela est particulièrement vrai pour certaines techniques dont on pressent à la fois une faisabilité technologique relativement aisée, mais aussi clairement des risques importants, comme c'est le cas par exemple pour la technique d'injection d'aérosols dans la stratosphère. Il pourrait aussi être intéressant de lancer quelques études pour établir si certaines propositions ne peuvent pas être écartées d'emblée en raison de leur faible efficacité ou parce qu'elles nécessiteraient des développements technologiques trop longs au regard du problème climatique ou une maintenance trop coûteuse.

La captation du CO₂ atmosphérique (CDR)

En matière de capture et de stockage du CO₂, on voit apparaître deux classes de technologies selon qu'elles restent confinées et/ou territoriales et s'apparentent à de la « dépollution », ou au contraire qu'elles sont transterritoriales et/ou utilisent les biens communs comme l'Océan. Ces deux catégories présentant des enjeux différents, il est important de les distinguer.

Il semble intéressant de diriger une partie de la recherche vers des techniques et technologies confinées et/ou territoriales permettant des émissions négatives, avec l'avantage qu'elles peuvent être appliquées localement dans un premier temps, avant d'être élargies pour conduire à des impacts plus importants. Comme pour les techniques de gestion du rayonnement solaire, le besoin de recherche est systémique, intégrant des aspects technologiques, une évaluation des risques, les enjeux de gouvernance, et les aspects économiques.

Géo-ingénierie en seconde intention

On voit apparaître des techniques où l'activité de géo-ingénierie arrive en seconde intention (par exemple, un refroidissement localisé peut être greffé à la production d'énergie renouvelable, la capture du CO₂ peut être associée à un dessalement de l'eau de mer, etc.). Il peut être intéressant de soutenir des recherches sur l'analyse de ces techniques qui représentent un risque limité par rapport aux bénéfices attendus et pourraient bénéficier d'un modèle économique plus favorable dès lors que la composante climatique pourrait être valorisée.

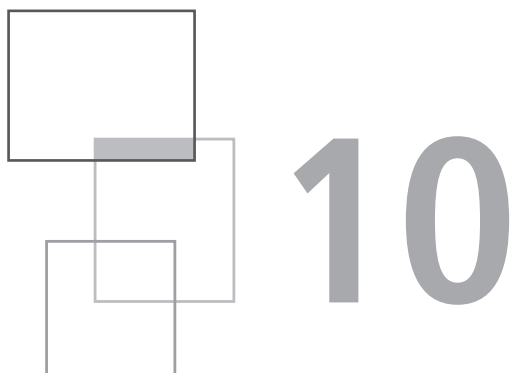
De l'importance d'une approche systémique

Comme cela a été indiqué plus haut, le besoin d'une approche systémique est fondamental dans l'évaluation de la géo-ingénierie. Il est en particulier important de prendre en compte les questions d'échelles spatiales et temporelles (y compris les questions relatives aux cycles de vie des technologies) ainsi que leur articulation. Les analyses de risques des différentes méthodes de géo-ingénierie doivent être développées : dans ces analyses le sujet de la réversibilité et des répercussions sur les longues et très longues échelles de temps joue un rôle majeur. Examiner les problèmes éthiques que soulèvent les différents projets d'intervention sur le climat est également un champ de recherche en soi, compte tenu des effets d'échelle (espace et temps) susceptibles d'être mis en jeu. Il faut toujours garder à l'esprit l'impact potentiel de la mise en œuvre de méthodes de géo-ingénierie sur les ressources nécessaires à d'autres activités humaines : on pense ainsi à l'énergie, mais aussi à l'eau qui peut devenir un facteur limitant pour la géo-ingénierie territoriale.

Références

- Benedetti-Doumic, A., et T. Martin, Note technique sur la géo-ingénierie de l'environnement, Principe du parasol solaire, Analyse préliminaire du concept proposé par Roger Angel, CNES, DCT/DA /PA - 2014.0010795, 2014.
- Boucher, O., P. M. Forster, N. Gruber, M. Ha-Duong, M. Lawrence, T. M. Lenton, A. Maas, and N. Vaughan, Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation, *WIREs Climate Change*, 5, 23-35, doi:10.1002/wcc.261, 2014a.
- Boucher, O., B. de Gillebon, L. Abbadie, P. Barré, S. Bekki, B. Bensaude-Vincent, S. Blain, D. Bonnelle, P. Ciais, F. Clin, A. Dahan, M.-L. Dangeard, R. de Richter, M. Dörries, L. Dumergues, B. Fisset, T. Gasser, F. Gemenne, S. Godin, B. Guillaume, M. Ha-Duong, J.-M. Laperrelle, P. Maugis, D. Montout, P. Perret, B. Quéguiner, D. Salas y Melia, F. Trolard, M. van Hemert, E. Vésine, et E. Vidalenc, *Atelier de Réflexion Prospective REAGIR : Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement*, document de synthèse version courte, avril 2014b.
- Crutzen, P.J., Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Clim Change* 2006, 77:211–220.
- de Gillebon, B., O. Boucher, L. Abbadie, P. Barré, S. Bekki, B. Bensaude-Vincent, S. Blain, D. Bonnelle, P. Ciais, F. Clin, A. Dahan, M.-L. Dangeard, R. de Richter, M. Dörries, L. Dumergues, B. Fisset, T. Keith, D. Gasser, F. Gemenne, S. Godin, B. Guillaume, M. Ha-Duong, J.-M. Laperrelle, P. Maugis, D. Montout,
- P. Perret, B. Quéguiner, D. Salas y Melia, F. Trolard, M. van Hemert, E. Vésine, et E. Vidalenc, *Atelier de Réflexion Prospective REAGIR : Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement*, document de synthèse version courte, avril 2014.
- Keith, D., A case for climate engineering, The MIT Press, 2013 (version française *Pour une ingénierie climatique planétaire* parue en 2015 aux Editions Antigone14)
- Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz, and G. Stenchikov (2009), Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19703, doi :10.1029/2009GL039209.
- Schäfer, S., Lawrence, M. ; Stelzer, H. ; Born, W. ; Low, S. ; Aaheim, A. ; Adriázola, P. ; Betz, G. ; Boucher, O. ; Cariu, A. ; Devine-Right, P. ; Gullberg, A. T. ; Haszeldine, S. ; Hay-wood, J. ; Houghton, K. ; Ibarrola, R. ; Irvine, P. ; Kristjansson, J.-E. ; Lenton, T. ; Link, J. A. ; Maas, A. ; Meyer, L. ; Muri, H. ; Oeschies, A. ; Proelß, A. ; Rayner, T. ; Rickels, W. ; Ruthner, L. ; Scheffran, J. ; Schmidt, H. ; Schulz, M. ; Scott, V. ; Shackley, S. ; Tänzler, D. ; Watson, M. ; Vaughan, N. (2015) The European Transdisciplinary Assessment of Climate

Engineering (EuTRACE) : Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth. Funded by the European Union's Seventh Framework Programme under Grant Agreement 306993.



La COP21 à Paris

(30 novembre - 12 décembre 2015)

L'accueil et le travail en commission

Le parc des expositions du Bourget est vaste. On y arrive par la navette à partir du RER et l'on y est accueilli par 195 colonnes blanches de 3 mètres de hauteur portant le drapeau des 195 pays présent à la COP21 (figure 10.1). Un pays, une colonne, quel que soit le poids diplomatique ou économique ou les émissions de gaz à effet de serre de chacun des pays. Un symbole voulu d'égalité et un appel à la modestie. Des soldats en arme circulent, mais l'accueil est chaleureux. De très nombreux jeunes gens, souriants, vous accueillent et vous guident d'un mot gentil. Même le contrôle de type aéroport est courtois et aimable.



Figure 10.1 Les colonnes et l'entrée de la Conférence (photo B. Tardieu)

Puis on entre dans le hall qui abrite de très nombreux stands. La zone la plus importante pour les échanges et les votes est celle des salles de réunion nommées du nom des fleuves français dont le Moroni en Guyane ou d'un numéro allant de 1 à 12. Les deux salles de séances plénières nommées Seine et Loire sont un peu plus loin. La salle Loire permet d'accueillir une nombreuse assistance en duplex quand la salle Seine est saturée. La deuxième zone importante est la salle des pavillons par pays ou groupes de pays qui contient de nombreuses salles de conférences pour des initiatives de chaque pays. Il y a de nombreux lieux de travail, de restauration, des salles de presse, etc.



Figure 10.2 *Des participants sud-américains (photo B. Tardieu)*

Pour donner une idée du déroulement, les paragraphes suivants présentent la brève réunion plénière du 9 décembre présidée par le ministre des affaires étrangères Laurent Fabius, la mise au point d'un texte important, puis le vote des textes en séance plénière et la participation à plusieurs conférences au pavillon de l'Afrique.

Le Club de Paris, CDP

La création du Club de Paris a été décidée lors de la 5^e plénière le 5 décembre 2015 afin de favoriser les consultations informelles destinées à faciliter les progrès et l'élaboration de compromis. Ce comité est présidé par Laurent Fabius assisté de deux vice-présidents, Jimena Nieto Carrasco de Colombie et Peter Horn d'Australie. Il est assisté d'experts en linguistique et en droit pour assurer la qualité technique de la proposition faite. Des « facilitateurs » ont pour mandat de traiter des différences de points de vue en se concentrant sur la recherche de solutions, en évitant les positions fixes ou les postures. Ce Club de Paris est l'outil de la recherche permanente de compromis pour obtenir l'unanimité. Du point de vue de la diplomatie, le travail effectué par ce relativement petit groupe est remarquable.

Exemple de mise au point de texte : les mécanismes de développement propre (MDP)

Le rôle et le fonctionnement des mécanismes de développement propre (*Clean Development Mechanism*) a déjà été décrit (Figure 10.3).

Le mode de fonctionnement de la mise au point est le suivant : le texte provisoire est affiché sur les écrans. Il a quatre pages et une page qui indique les entités accréditées et désignées par l'*Executive Board* du mécanisme de développement propre. Les paragraphes ou parties de phrases entre crochets sont celles pour lesquels il n'y a pas d'accord. Chaque pays qui le souhaite demande la parole en levant le carton au nom du pays posé sur son pupitre. Lorsqu'un pays ou un groupe de pays (un pays, par exemple l'Égypte, parle en son nom et au nom des pays arabes) est d'accord avec la proposition faite par un autre pays, il l'indique verbalement. Dans le cas présent, les désaccords se sont cristallisés :

- sur le paragraphe 14 qui concerne la connexion entre les MDP et d'autres mécanismes financiers pour supporter l'activité des MDP, notamment si le prix du carbone est très bas ;
- le paragraphe 24 sur la démonstration d'additionnalité.

Ces deux points sont effectivement délicats. Le représentant du Congo propose deux fois qu'un prix minimum du CO₂ soit indiqué. Deux représentantes du secrétariat viennent courtoisement lui indiquer que ce n'est pas le lieu d'un tel débat et que le texte ne peut pas contenir une telle considération.

Lorsque la discussion se bloque, la séance est suspendue et les parties se concertent sur place par affinités, pour tester des idées ou pour mieux comprendre les discussions qui se tiennent en anglais.



Figure 10.3 Travail en commission (photo B. Tardieu)

Après un quart d'heure ou une demi-heure, la réunion reprend. L'accord se fait. Le document est passé en revue, paragraphe par paragraphe, adopté paragraphe par paragraphe, puis le maillet s'abat, le texte est approuvé pour être transmis à la COP.

Le lendemain, jeudi 10 décembre, la séance plénière est convoquée à 15 heures (figure 10.4) d'abord pour la COP, puis pour le CDP (Le club de Paris présenté ci-dessus). Tous les documents préparés sont votés sous la présidence d'un africain à l'autorité souveraine.



Figure 10.4 La salle Loire durant une séance plénière (photo B. Tardieu)

La séance est en français. Chaque document est brièvement présenté, ouvert à la discussion. Après un temps de silence, le président dit : « *Je n'entends pas d'objection, la proposition est donc acceptée* » et le maillet s'abat. Après une heure, la représentante de Trinidad et Tobago indique être membre des « 77 pays » et indique que les choses progressent si vite qu'elle n'a pas compris certaines décisions. Sa requête est analysée en séance par le secrétariat et la réponse qui lui est donnée la satisfait.

Les conférences et les échanges

Dans les pavillons nationaux et régionaux, des conférences se succèdent avec un nombre très variable d'auditeurs. Dans le pavillon Afrique, il y a deux grandes salles de conférences pouvant accueillir 200 personnes chacune. Les sujets traités sont nombreux et intéressants. En voici quelques exemples.

Le 9 décembre, une conférence a pour sujet les ressources en eau en Afrique de l'Est, avec une attention toute particulière attachée à l'effet d'*El Niño*¹⁵ et de la *Niña*, aussi appelés phénomènes ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Ces phénomènes du Pacifique Sud ont un impact important sur les pluies en Afrique de l'Est, en

15. *El Niño* signifie l'enfant (Jésus) car il nomme un phénomène qui survient toujours peu après Noël sur la côte ouest de l'Amérique du Sud. À l'origine, cela correspondait à un courant saisonnier chaud le long des côtes du Pérou ou du Chili, où l'eau est ordinairement froide (moins de 15 °C l'été). Cela mettait fin à la saison de pêche. Le terme a été conservé pour nommer le phénomène particulier qui se caractérise par des températures élevées de l'eau dans la partie est de l'océan Pacifique Sud. Ce phénomène « oscillant » a un impact fort sur les pluies en Amérique du Sud et en Afrique.

interaction dipolaire (disent les climatologues) avec l'océan Indien tout proche. Les sept pays de la corne de l'Afrique réunis dans l'IGAD (*Intergovernmental Authority on Development*) – Kenya, Somalie, Ouganda, Soudan nord et Soudan sud, Éthiopie –, auxquels se sont ajoutés récemment le Burundi, le Rwanda et la Tanzanie au sein de l'ICPAC (*Igad Climate Prediction and application center*) implanté à Nairobi, sont tous concernés par ces problèmes de sécheresses et de fortes pluies. Les orateurs insistent sur le manque d'observations et de mesures des sécheresses, l'absence de gestion des données, la très faible capacité de détection précoce des périodes à risques, la préparation de la gestion des catastrophes dans les différents secteurs économiques et les mesures possibles d'adaptation. Malgré la grande instabilité de la région, il existe des autorités intergouvernementales pour coordonner les différents organismes qui s'occupent des phénomènes météorologiques. Les orateurs exposent la grande variabilité des pluies et leur forte saisonnalité. L'augmentation de la population, la modification de l'usage des sols, les migrations dues aux phénomènes de guerre jouent un rôle majeur dans les difficultés des populations. Ce sont des freins majeurs au développement économique. La COP et les réunions régionales Climat permettent à ces onze pays de se rencontrer et d'élaborer des stratégies communes, ce qui est exceptionnel dans une région où les gouvernements sont souvent affaiblis par les conflits régionaux, les guerres.

Les conclusions techniques sont que le phénomène El Niño 2015 n'est pas aussi fort dans la région que ce qui avait été parfois annoncé. L'amplitude est plus faible que ce qu'elle avait été en 1991 et 1997, mais la saison n'est pas terminée. Les pluies ont un impact positif sur les cultures et le remplissage des réservoirs, mais sont destructrices lors s'il y a excès (précipitations ou débits). Comme on dit à Tombouctou, sur le bord du Niger : « *Ce que l'eau détruit, elle le rend au centuple* ».

Dans tous ces débats, la résolution des problèmes immédiats l'emporte sur l'élaboration de stratégies à long terme, mais les COP permettent ces rencontres et ces élaborations communes. Les problèmes de paix et de migration font partie des questions urgentes. Grâce aux MDP ou au fonds vert pour le climat, des financements pourront être trouvés pour améliorer globalement la situation et les prévisions, diminuer les vulnérabilités et améliorer la résilience collective. Le Fonds vert pour le climat est un mécanisme de l'Organisation des Nations unies destiné à réaliser le transfert de fonds des pays les plus avancés vers les pays les plus vulnérables aux effets des changements climatiques.

Le 10 décembre, une conférence a abordé la question des zones humides en Afrique et de l'élargissement des accords de Ramsar sur leur protection. Les zones humides sont les châteaux d'eau de l'Afrique et leur importance est capitale ; par exemple, la zone du Fouta Djallon, la boucle du Niger, la zone du lac Tchad, les plateaux éthiopiens, le fleuve Congo et ses affluents, le plateau angolais et l'Okavango, etc. La connaissance de ces zones humides et des nappes phréatiques associées est essentielle pour anticiper le développement économique de l'Afrique, en prenant en compte l'augmentation de la population et des consommations d'eau. De grands progrès ont été accomplis dans l'évaluation de ces zones grâce à la précision croissante des images satellitaires. Des exemples convaincants sont montrés au Maroc, sur le

Loukkos. Mais, malgré cela, les orateurs insistent sur l'insuffisance du nombre des observations et des mesures sur l'ensemble du continent africain, sur les contrôles de fiabilité et sur les échanges interrégionaux. L'objectif est de fournir aux populations un service de prévision à court et moyen termes pour leur permettre de s'adapter, pour augmenter la résilience et pour déceler progressivement les tendances des cycles hydriques. Plusieurs orateurs insistent sur la nécessité de la recherche pour améliorer la compréhension des phénomènes et des mécanismes en jeu.

Au cours de ces journées, on a l'impression que les sujets urgents sont nombreux et difficiles et qu'il faut y ajouter la projection dans le futur de phénomènes climatiques mal connus localement et complexes. Dans le discours habituel de solidarité avec les générations futures, ils nous appellent, nous les pays riches, à penser aussi aux générations présentes dans les pays les moins avancés.

Pour changer de ton, dans le beau pavillon des États-Unis, moins luxueux cependant que le pavillon des pays arabes, un exposé est présenté par un représentant de la NASA qui propose deux messages :

- à chaque fois que la communauté internationale s'est donnée pour objectif de résoudre un problème collectif touchant au climat, elle a réussi. Il donne l'exemple des oxydes d'azote et surtout de l'ozone dont le célèbre trou nous préoccupait dans les années 1970. Cette question a fait l'objet d'un protocole à Montréal qui a progressivement éliminé les gaz CFC de tous les usages. L'évaluation faite en 2014 par la NASA, grâce à ses satellites témoigne de l'inversion de la tendance avec un retour à l'état normal prévu vers 2100 ;
- les progrès de l'analyse par satellite permettent de modéliser les grands phénomènes planétaires, incroyablement complexes, avec un contraste saisissant entre les deux hémisphères. Ces analyses satellitaires pourront jouer un rôle, d'une part, pour tester les modèles et pour y introduire des données et, d'autre part, pour évaluer les émissions par régions et pour tester l'efficacité des politiques énergétiques. À une question sur les analyses du méthane, il est répondu que le sujet est très important, mais particulièrement difficile du fait de sa faible durée de vie dans l'atmosphère et de la multiplicité des sources naturelles et anthropiques avec de fortes interactions.

Le pavillon européen, les pavillons des États-membres (notamment de la France et de l'Allemagne) n'exposent pas beaucoup de messages, ni sur la politique énergétique très volontariste de la Communauté européenne ni sur la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (17 Aout 2015) de transition verte en France ou sur l'*Energiewende*¹⁶ en Allemagne. La France mentionne : « *Nous avons des solutions* », mais ces solutions ne sont pas exposées sinon par des fiches. En tant qu'Européen, on peut être déçu que la politique de l'UE ne soit pas explicitée. L'objectif 20-20-20 ne se limite pas aux émissions de GES. Malgré le *Green Paper* de 2013, les objectifs restent très orientés vers l'augmentation de la part d'énergies renouvelables dans le mix électrique, ce qui n'est qu'une petite partie du problème.

16. Transition énergétique.

La contribution de l'Union européenne (INDC- *Intended Nationally Determined Contribution* en anglais) a été soumise le 6 mars 2015. Cette contribution engage la communauté à une réduction des émissions de GES d'au moins 40 % en 2030 comparé à 1990. Il aurait pu être judicieux que la Commission européenne expose quel sera le principe de la répartition entre les États membres de la baisse commune d'émission de GES.

La séance plénière du 9 décembre



Figure 10.5 La salle Seine (photo B. Tardieu)

Cette réunion présidée par Laurent Fabius débute finalement à 18 h et n'a duré que 10 minutes. Dans la grande salle « Seine » (figure 10.5) et en duplex dans la grande salle « Loire », tous les pays et organismes représentés sont présents. Laurent Fabius parle en français (les traductions simultanées sont faites en anglais, espagnol, russe, arabe et japonais). Il évoque la longue nuit de travail : *Une nouvelle version du projet d'accord a été élaborée. Cette version réduit le texte de 43 pages à 29 pages, ce qui est une bonne chose. Les trois quarts des points qui étaient entre crochets ont été résolus. Pour quelques-uns de ces points, l'accord n'est pas encore atteint. Il reste des compromis et des choix politiques à faire, avec l'aide des « facilitateurs ». Le texte reflète les compromis naissants, avec une vision d'ensemble des progrès réalisés. Il faut maintenant se concentrer sur les questions qui restent ouvertes. Pour cela, il faut faire une cartographie de ces points de manière à obtenir un accord « juridiquement contraignant, ambitieux, équilibré et durable ». Il reste notamment des questions sur l'analyse des pertes et dommages et dans l'élaboration du cadre de transparence pour assurer le suivi des efforts. Rien n'est agréé tant que tout n'est pas agréé.*

Selon la tradition, la séance est fermée par un coup de maillet. Le texte dans son état actuel est distribué en anglais. *Les parties ont plusieurs heures pour se concerter. La prochaine réunion a lieu à 20 heures. Les réactions sur le texte seront exprimées, puis les parties se mettront au travail pour adopter le texte, avec pour boussole la nécessité d'un compromis.*

La nuit se passa puis la journée du vendredi, dans l'attente de la convocation pour la plénière, finalement reportée à samedi 9 heures. Ban Ki-moon¹⁷ dit : « *La fin est en vue, finissons le travail, le monde nous regarde* ».

Une nouvelle nuit de travail attend les parties pour s'accorder sur le texte final. Enfin, le samedi à 13 heures, le maillet s'abat après un temps de silence témoignant de l'absence d'opposition. Longs applaudissements. Laurent Fabius, fatigué et ému, remercie les parties : « *L'accord de Paris permet à chaque délégation de rentrer dans son pays la tête haute* ».

Ban Ki-moon : « *Pour la première fois, tous les pays du monde (195 en fait) se sont engagés à limiter les émissions, à renforcer la résilience et à se joindre à une cause commune pour le climat* ».

Le président de la République François Hollande : « *La France a vu beaucoup de révolutions. Aujourd'hui, nous avons vu la plus belle et la plus pacifique des révolutions* ».

L'accord de Paris

Dans le document final de la Conférence des Parties, 21^e session, Paris 30 novembre-11 décembre 2015 au point 4 b de l'ordre du jour figure l'adoption de l'accord de Paris, proposition du Président, projet de décision -/CP.21 auquel est annexé l'accord de Paris lui-même.

Le projet de décision

Il est court : 22 pages en français. Une introduction rappelle les raisons de cet accord, c'est-à-dire « *les changements climatiques sont un sujet de préoccupation pour l'humanité tout entière* ». Cette introduction donne comme objectif de « *poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°* ». Est-ce ambitieux ou optimiste ? En 2020 ou 2030, l'élévation de température sera en dessous de + 1,5 °C, mais l'accord permettant de prendre les dispositions qui permettent de limiter l'élévation des températures à moins de 1,5 °C sera-t-il adopté ? Du point de vue financier, il est dit que des mesures ambitieuses et précoces ont un effet bénéfique sur la réduction importante du coût des efforts futurs d'atténuation et d'adaptation.

Adoption

Le groupe de travail spécial de l'accord de Paris continue de jouer un rôle pour la mise en vigueur de l'accord et pour différentes tâches.

17. Ban Ki-moon est un diplomate et homme politique sud-coréen. Il est l'actuel secrétaire général des Nations unies

Contributions prévues déterminées au niveau national (acronyme anglais souvent utilisé INDC-*Intended Nationally Determined Contribution*)

Les contributions déterminées au niveau national n'ont pas été remises par tous les pays. En février 2016, 160 contributions ont été remises représentant 188 pays du fait de la contribution commune européenne. Un appel est lancé pour que tous les pays remettent leur contribution. Les besoins d'adaptation ont été exprimés par « *bon nombre de pays en développement* » afin de solliciter assistance et aide financière. Le GIEC est invité à présenter en 2018 un rapport sur les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1,5° par rapport aux niveaux préindustriels.

Décisions visant à donner effet à l'accord

Atténuation

Ce point insiste à nouveau sur les contributions nationales, notamment sur la fixation du point de référence et sur la clarté des engagements. Un registre public provisoire enregistrera les contributions nationales à partir du premier semestre 2016. Le groupe de Paris doit donner des directives pour la comptabilisation des contributions nationales, « *sur la base de méthodes et de paramètres de mesures communs évalués par le Giec* ». L'enregistrement des contributions nationales, leur contrôle et leur suivi dans le temps est probablement le progrès le plus marquant et le plus significatif de la COP21.

Adaptation

Ce paragraphe concerne les pays en développement et le comité de l'adaptation. Il invite l'ensemble des institutions financières internationales, régionales et nationales à fournir des informations sur la manière dont leurs programmes d'aide au développement incorporent des mesures de protection et de résilience aux changements climatiques. Il demande de renforcer la coopération régionale et, au fonds vert pour le climat, d'accélérer la fourniture de l'appui aux pays les moins avancés.

Pertes et préjudices

En 2016, on procédera à l'examen du mécanisme international de Varsovie relatif aux pertes et préjudices liés aux incidences des changements climatiques. L'article 52 « *convient que l'article 8 de l'accord ne peut donner lieu ni servir de fondement à aucune responsabilité ni indemnisation* ». Cela signifie que, si par exemple une maison est détruite par un cyclone que son propriétaire estime provoqué au moins dans son ampleur exceptionnelle par le changement climatique, il ne peut tenter une action individuelle ou collective contre les compagnies qui extraient un combustible fossile ou contre celles qui le brûlent. On comprend l'importance de cette clause pour les industriels de ces secteurs. On peut être déçu que ceci leur retire toute responsabilité, en oubliant que c'est l'acheteur final, c'est-à-dire chacun de nous, qui justifie toute la chaîne industrielle et économique. La responsabilité climatique est

globale. Les pays les moins avancés peuvent, à juste titre, s'estimer victimes, mais c'est aux citoyens des pays riches d'assumer collectivement cette responsabilité.

Financement

Ce paragraphe est souvent conditionnel ou incitatif. L'article 59 « *décide que le fonds vert pour le climat et le fonds pour l'environnement mondial, le fonds pour les pays les moins avancés, le fonds spécial pour les changements climatiques concourent à l'application de l'accord* ». Il est important d'éviter absolument que les fonds dits d'aides publiques au développement (APD) ne soient détournés vers les fonds cités ci-dessus. Il s'agit bien d'un supplément de fonds destinés à l'adaptation au changement climatique qui s'ajoute et renforce les fonds pour le développement durable.

Mise au point et transfert de technologies

Le mécanisme technologique est renforcé, l'organe subsidiaire du conseil scientifique et technologique élaborera, en mai 2016, le cadre technologique en application de l'accord en vue d'une recommandation à la COP22 à Marrakech.

Renforcement des capacités

Le comité de Paris sur le renforcement des capacités est créé. Il sera chargé de remédier aux lacunes et de répondre aux besoins, actuels et nouveaux, liés à l'exécution d'activités de renforcement des capacités dans les pays en développement. Un plan de travail est lancé pour la période 2016-2020. L'article 83 « *engage toutes les parties à veiller à ce que l'éducation, la formation et la sensibilisation du public soient bien prises en compte* ».

Transparence des mesures et de l'appui

L'article 85 « *décide de mettre en place une Initiative de renforcement des capacités pour la transparence afin de développer les capacités institutionnelles et techniques avant 2020 et après cette date* ». Cet article ne s'applique qu'aux aspects climatiques, mais l'exigence de transparence est assez éloignée de toutes les traditions de la diplomatie internationale, quelles que soient l'époque et la puissance relative des parties. Vaste sujet donc.

Bilan mondial / Facilitation de la mise en œuvre et du respect des dispositions / Clauses finales

Action renforcée avant 2020

La question du financement est abordée article 115 sans citer le fonds vert. Il est dit : « *...demande fermement aux pays développés parties d'amplifier leur aide financière, en suivant une feuille de route concrète afin d'atteindre l'objectif consistant à dégager ensemble 100 milliards \$ par an d'ici 2020...* ».

Le montant total de l'aide publique au développement est en 2014 de 134 milliards \$ à laquelle s'ajoutent les actions des fondations privées ou gérées par des ONG. Ce montant est clairement insuffisant pour atteindre les objectifs constants de diminution de la pauvreté, d'accès à l'eau potable, à l'électricité, etc. qui pèsent sur les pays les moins avancés. Il ne faut certainement pas baisser ces montants d'aide pour financer les actions d'atténuation. Nous avons vu, au cours des conférences du pavillon africain, que les deux objectifs peuvent se conforter et améliorer sensiblement la situation dès aujourd'hui. Notons que le montant des subventions aux énergies renouvelables en Allemagne est d'environ 23 milliards € par an.

Plusieurs articles concernent les petits états insulaires et la forêt.

À l'article 122, il est dit : « *décide que deux champions de haut niveau seront nommés afin d'agir pour le compte de la présidence de la Conférence de Paris pour faciliter par une participation renforcée de haut niveau pendant la période 2016-2020 l'exécution des activités actuelles...* ». Nous ne connaissons pas encore le nom de ces deux champion(ne)s, ni quelle sera précisément leur mission.

Entités non parties

Les articles 134 à 137 reprennent l'article 118 qui se félicite de leur action et encourage l'affichage de leurs actions sur le portail des acteurs non étatiques pour l'action climatique.

Questions administratives et budgétaires

L'article 140, demande instamment aux Parties de verser des contributions volontaires afin que la présente décision soit mise en œuvre en temps voulu.

Texte de l'accord de Paris

Il est court : 16 pages et 29 articles. Une introduction d'une page et demie présente les arguments de cet accord en donnant la parole à toutes les parties et à toutes les sensibilités, comme les droits des peuples autochtones, les communautés locales, les migrants, mais aussi l'égalité des sexes, l'autonomisation des femmes et l'équité entre les générations. Malgré sa brièveté, cette introduction donne à la signature de tous quelques signaux collectifs, pas toujours partagés aujourd'hui.

L'article 2 limite l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels.

L'article 4 est important, même si le verbe est faible : « *Les parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre, ... et à opérer des réductions... de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle...* ».

Le document remis le 9 décembre en séance présentait deux options citées en anglais car ce texte ne semble pas exister en français :

- Option 1 : *Parties collectively aim to reach the global temperature goal referred to in Article 2 through a peaking of global greenhouse gas emissions as soon as possible, recognizing that peaking requires deeper cuts of emissions of developed countries and will be longer for developing countries ; rapid reductions thereafter to (40-70 per cent)(70-95 per cent) below 2010 levels by 2050 ; toward achieving net zero greenhouse gas emissions (by the end)(after the middle) of the century informed by best available science, on the basis of equity and in the context of sustainable development and poverty eradication.*
- Option 2 : *Parties collectively aim to reach the global temperature goal referred to in Article 2 through a long-term global low emissions (transformation toward (climate neutrality) (decarbonization)) over the course of this century informed by best available science, on the basis of equity and in the context of sustainable development and poverty eradication.*

Cela donne une idée de l'intensité des négociations en ces quelques jours...

La contribution déterminée au niveau national par chaque partie fait l'objet des articles 8 à 19.

L'article 4.12 introduit le registre public tenu par le secrétariat.

L'article 5 propose de renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre, ce qui, dans ce texte, concerne essentiellement le soin des forêts.

L'article 6 traite de l'atténuation globale des émissions mondiales.

L'article 7 traite de l'adaptation au changement climatique et fait référence au cadre d'adaptation de Cancun.

L'article 8 traite des pertes et préjudices liés aux effets néfastes des changements climatiques et fait référence au mécanisme international de Varsovie, avec les domaines suivants :

- a) Les systèmes d'alerte précoce.
- b) La préparation aux situations d'urgence.
- c) Les phénomènes qui se manifestent lentement.
- d) Les phénomènes susceptibles de causer des pertes et préjudices irréversibles et permanents.
- e) L'évaluation et la gestion complète des risques.
- f) Les dispositifs d'assurance dommages, la mutualisation des risques climatiques et les autres solutions en matière d'assurance.
- g) Les pertes autres qu'économiques.
- h) La résilience des communautés, des moyens de subsistances et des écosystèmes.

L'article 9 parle des ressources financières. Il est dit que le mécanisme financier de la convention remplit les fonctions de mécanisme financier de l'accord. Le fonds vert n'est pas cité.

L'article 10 traite des mises au point et des transferts de technologies.

L'article 11 traite du renforcement des capacités des pays en développement.

L'article 12, très bref, traite de l'éducation de la formation et de l'information dans le domaine du changement climatique.

L'article 13 propose un cadre de transparence, « *assorti d'une certaine flexibilité qui ne soit ni intrusive ni punitive et qui respecte la souveraineté nationale* ». Il n'est pas vraiment question de contraintes, ni donc d'accord contraignant. Chaque partie fournit régulièrement un rapport national d'inventaire des émissions anthropiques et des absorptions anthropiques.

Les articles 14 à 20 précisent des points de fonctionnement.

L'article 21 indique que l'accord entre en vigueur le trentième jour qui suit la date du dépôt de leurs instruments de ratification, d'acceptation, d'approbation et d'adhésion par 55 parties à la convention représentant au total au moins 55 % du total des émissions mondiales.

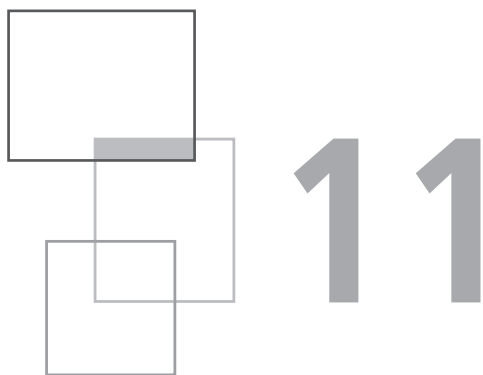
Les articles 22 à 29 sont des points d'organisation.

Puis viennent les signatures des parties prenantes.

Pour conclure

Cet accord est diplomatique : il se juge aux engagements acceptés par toutes les parties. C'est là que le progrès est considérable, ainsi que dans l'enregistrement, le contrôle et le suivi de ces engagements nationaux.

Il ne faut donc pas être surpris de n'y trouver aucune mention industrielle ou technologique. Les mots « charbon », « pétrole », « gaz » n'existent pas plus que les mots « transports », « voitures », « avions », « nucléaire » ou « renouvelables ». Ces sujets, c'est maintenant qu'il faut les aborder avec des objectifs précis en vue.



2016 : de la COP 21 à la COP 22

2016, l'année des signatures de l'accord de Paris

2016 a été l'année de la présidence française. Celle-ci a commencé au début de la COP21, le 30 novembre 2015 et a duré jusqu'à la COP22 du 7 novembre au 18 Novembre à Marrakech au Maroc.

À l'occasion du G20 à Hangzhou en Chine, les 4 et 5 septembre 2016, la Chine puis les États-Unis ont ratifié l'accord. C'est évidemment essentiel puisque la Chine est responsable de 20 % des émissions mondiales et les États-Unis de 18 %. L'Inde a suivi le 2 octobre. Elle émet un peu plus de 4 % des émissions mondiales. L'accord de Paris, daté du 12 décembre 2015, est entré en vigueur le 4 novembre 2016, signé par 189 pays sur 196, soit comme convenu, plus de 55 pays représentant plus de 55 % des émissions de gaz à effet de serre.

C'est un progrès collectif fondamental. C'est le jugement des citoyens du monde qui appliquera une contrainte, soit à l'intérieur de chaque pays, soit à l'extérieur. Dans certains pays, des citoyens ont attaqué leur propre État, selon la juridiction interne propre, pour, à leur appréciation, n'avoir pas tenu ses engagements climatiques. On peut supposer que le poids d'un pays dans le monde n'est pas indépendant de la démonstration qu'il fait de sa sensibilité aux problèmes collectifs, surtout pour les très grands pays qui ne manquent pas d'ambitions hégémoniques. Les États-Unis et la Chine ont tenu à défendre leur désir (volonté ?) de leadership, et ont signé l'accord le même jour. Chaque pays, chaque acteur est face à la population mondiale

et souhaite donner une image positive de son action. C'est également le cas des grandes entreprises internationales. C'est ce que les Anglo-Saxons nomment *Name and Shame*, c'est-à-dire nommer et couvrir de honte, c'est ce que nous appelons le « bonnet d'âne » : chaque pays est libre de prendre l'engagement qu'il décide, mais tout le monde le sait. Si cet engagement est trop faible comparé à ce que font les autres pays, ou trop explicitement égoïste, c'est la réprobation de sa propre population et/ou de la population de la planète qui intervient et qui devrait jouer un rôle de régulateur sur les engagements des différents pays. À l'inverse, un engagement trop coûteux pour un pays pourrait être critiqué par la population du pays comme correspondant à un effort disproportionné et non équilibré. C'est là que se situe le basculement de cette COP21. Et c'est en même temps un tournant dans la gouvernance mondiale et une nouvelle évolution positive de ce que les spécialistes de sciences politiques appellent le « système post-westphalien ».

Une révision des engagements nationaux aura lieu tous les 5 ans. Cette révision devra ne pas proposer de recul dans les engagements des pays.

Il est clair que l'objectif proposé de 1,5 °C n'est pas accessible dans la configuration actuelle de l'usage des combustibles fossiles. Pour l'instant, l'accord de Paris n'appelle pas explicitement à élaborer une réelle rupture dans l'usage des ressources énergétiques fossiles et aucune proposition n'est faite pour taxer les combustibles fossiles à l'extraction ou à l'usage.

Les parties ont pris progressivement conscience qu'aucun accord n'est imaginable sur la base d'objectifs chiffrés comme cela était proposé à Kyoto. Le choix du système déclaratif est un progrès considérable car les données vont être de plus en plus disponibles et accessibles, ce qui permet de sortir des postures et des effets d'annonce. Les progrès technologiques vont permettre des mesures de plus en plus précises des émissions de GES.

La COP22 à Marrakech avait pour mission de commencer à élaborer des règles pour le suivi des engagements : mesures, contrôle, transparence, comité d'experts et champions. Tous ces points sont fondamentaux.

Parmi les 195 pays, beaucoup manquent de moyens et de connaissances pour publier leurs émissions. Le CO₂ provenant de la combustion des combustibles fossiles est relativement simple à évaluer sur la base des quantités de charbon et d'hydrocarbures solides, liquides et gazeux importés ou extraits du territoire et brûlés sur le territoire. Actuellement, les combustibles fossiles extraits d'un territoire ne sont pas comptabilisés à leur extraction, mais dans le lieu de la combustion. Pourtant, la très grande majorité (hors chimie) de ce qui est extrait du sous-sol est finalement brûlé et c'est bien l'extraction de combustible fossile qu'il faut progressivement arrêter d'augmenter, puis réduire. L'accord de Paris, article 13-11, indique : « *Pour les pays en développement parties qui en ont besoin... le processus d'examen les aide à définir leurs besoins en matière de renforcement de capacité (pour évaluer leurs émissions et les projeter dans l'avenir)* ».

Pour les autres gaz à effet de serre, et notamment le méthane, l'analyse est plus complexe et n'est pas à la portée de tous les pays.

Un accord contraignant pour les États membres de l'UE

Chaque État européen compte pour un et la Communauté européenne compte également pour un. Elle ne peut, en principe, ratifier l'accord que si les 27 États membres l'ont fait. En fait elle a ratifié l'accord le 30 septembre 2016 (procédure de « ratification accélérée »).

La remise des engagements nationaux (INDC, *Intended nationally Determined Contribution*) n'est pas réellement une contrainte pour les États de la planète, en dehors du *Name and shame*. En revanche, elle le sera pour les États membre de la Communauté européenne. L'Europe avait remis sa contribution (INDC) dès le 6 mars 2015. Cette soumission très brève avait été remise par la présidence lituanienne au nom de la Commission européenne et de ses États-membres. L'accord de Paris va devenir effectivement contraignant pour les États-membres de la Communauté européenne par l'action de cette dernière. Dans le texte de la soumission collective de l'Europe, la Commission européenne continue de se poser en leader climatique, en pressant les autres « parties » de remettre leur contribution et en souhaitant de futures discussions pour évaluer l'équité et l'ambition des autres parties. Pourtant, le bilan de l'Europe n'a pas de raisons d'être triomphant. Si l'Europe est en avance sur ses prévisions de baisse d'émission de GES, c'est en grande partie pour des raisons indépendantes des actions entreprises : l'année de référence est 1990, juste avant la réunification de l'Allemagne et avant l'entrée de 19 nouveaux pays (Autriche, Bulgarie, Chypre, Croatie, Espagne, Finlande, Grèce, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Malte, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Slovaquie, Slovénie et Suède). Parmi ces pays, beaucoup sortaient, comme l'Allemagne de l'Est, d'un système économique délabré. La mise à niveau de ces économies a été source de diminution des émissions. Cela ne se produira pas une seconde fois. Par ailleurs, depuis 2008, la crise économique a réduit l'activité industrielle et, par conséquent, les émissions de GES de l'ensemble des pays de l'Union, excepté en Allemagne. Le manque d'analyse économique prévisionnelle, avant de lancer les objectifs 20-20-20, la trop grande focalisation sur l'électricité (qui ne représente que 20 % de la consommation globale d'énergie, pour les usages spécifiques hors chauffage par exemple) et l'absence de coordination entre les États-membres n'ont pas été de bons guides pour une action climatique efficace. Le temps est venu pour l'Europe de concentrer ses efforts sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre des 27 États-membres en limitant fortement, dans la durée, les politiques de subventions nationales qui sont sources de bulles spéculatives et de déséquilibres économiques comme nous allons le voir paragraphe suivant. La répartition de l'effort (*effort sharing*) entre les États-membres a été négociée en 2016 et n'a pas été facile. Finalement le texte qui a été voté à l'unanimité détermine les efforts à faire par chaque État membre en fonction de son PIB par habitant, donc de sa richesse. Ce choix ne tient pas compte du niveau actuel d'émission qui est très différent selon les États membres. Les deux graphiques suivants (Figures 11.1 et 11.2) montrent les émissions actuelles par pays et les objectifs de réduction également par pays avec le résultat pour la Communauté européenne, soit 10 %.

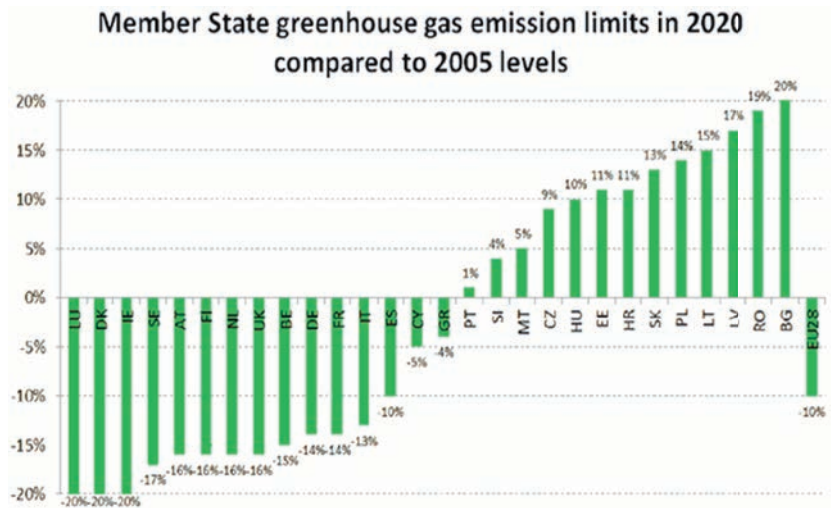


Figure 11.1 Émissions des États membres : limites en 2020 comparées à 2005 (therationalpessimist.com)

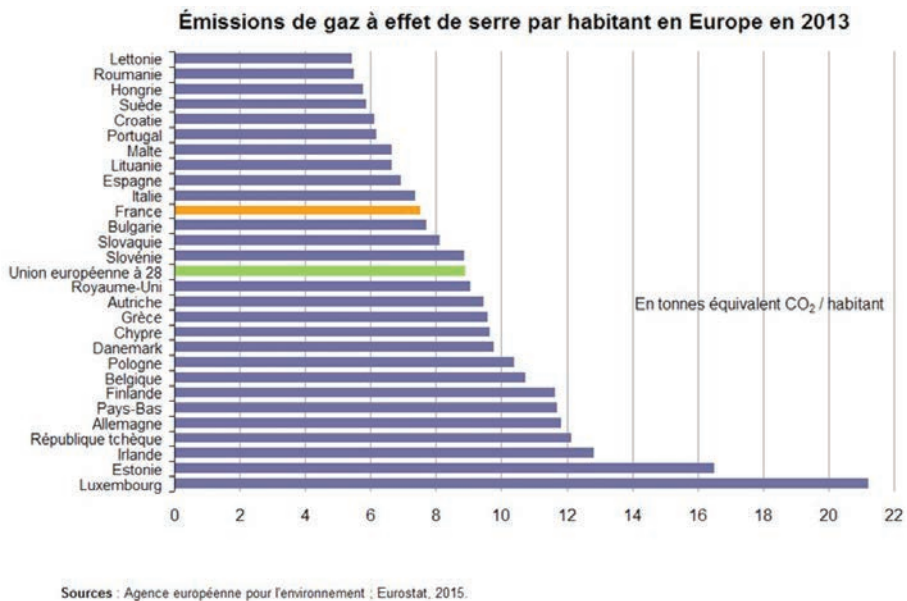


Figure 11.2 Émissions de gaz à effet de serre par habitant en Europe en 2013

La France doit faire sensiblement le même effort que l'Allemagne bien que ses émissions soient nettement plus faibles. C'est un choix délibéré du gouvernement français. Pour l'instant, cet objectif militant n'est pas associé à une stratégie industrielle

qui devrait lier cet effort au développement de forces industrielles nationales orientées vers les marchés internationaux.

Du point de vue européen, cette répartition entre les États membres permet de satisfaire l'objectif global de 10 %.

Le prix du carbone, les avancées en 2016

Donner un prix au carbone est une façon de donner une valeur économique à la quantité d'émission de gaz à effet de serre émise ou, au contraire évitée, et donc de comparer les différentes politiques énergétiques possible. C'est aussi une manière de donner aux citoyennes et aux citoyens un moyen de comparer les efforts réalisés et donc d'élaborer un langage commun qui est aujourd'hui absent du discours politique.

Il est utile de distinguer :

Le **prix effectif** est celui que l'on déduit des subventions et avantages divers qui sont accordés à un secteur de l'énergie.

Par exemple, le système présent de subventions et d'achats conduit à un prix du CO₂ calculé par le ministère des finances au début 2016 qui est bien supérieur aux valeurs généralement admises. Par exemple, les émissions de CO₂ évitées grâce à l'installation de panneaux photovoltaïques intégrés au bâti correspondent à des valeurs comprises entre 200 et 500 €/tonne de CO₂ évité et à 71 €/tonne pour les panneaux photovoltaïques installés au sol. Il est de 59 €/tonne pour l'éolien terrestre mais de seulement quelques euros pour le bois, la géothermie, le biogaz et 44 €/tonne pour les réseaux de chaleur, sans que la raison en soit présentée. Or le prix de marché expliqué au chapitre 4 n'est aujourd'hui que de 5 €/tonne et n'a jamais dépassé 30 €/tonne. Ces valeurs de prix effectifs sont sensiblement les mêmes en Allemagne et en France parce que, dans les deux pays, on suppose que les énergies non carbonées se substituent à de la production de centrales à gaz fossile. Pourtant, aujourd'hui, c'est plutôt du lignite qui est utilisé marginalement en Allemagne (qui émet plus de CO₂ que le gaz), et de l'énergie nucléaire et de l'énergie hydraulique en France (qui n'émettent pas de CO₂ fossile). Ces prix effectifs sont des prix locaux et temporaires puisqu'ils dépendent du type de production, du lieu et de l'instant : les subventions sont nationales et elles évoluent dans le temps.

Le **coût socio-économique** reflète la conséquence pour la société de l'émission d'une tonne additionnelle de CO₂. Il est par définition planétaire et futur. Il est très difficile à évaluer.

Le **prix marginal d'évitement** qui est le prix qu'un État se donne pour atteindre ses objectifs d'émission. La France a choisi un prix qui augmente de 8,3 €/tonne en 2017 à 27,3 €/tonne en 2030. Un comité présidé par Gérard Mestrallet rejoint la recommandation des académies des technologies européennes qui est un prix plancher de 20 à 30 €/tonne croissant jusqu'à 50 €/tonne en 2050.

Le système EU ETS (échange de permis d'émissions européen) présenté chapitre 4 est une approche libérale qui propose d'approcher le prix du carbone par un mécanisme de marché. Ce principe de marché a parfois été critiqué (notamment par une encyclique du pape François). Certains l'ont appelé le « droit à polluer ». Cette critique du principe d'échange peut paraître justifiée. Il n'en reste pas moins que ce système fonctionne, que des solutions sont en cours d'application et notamment une réduction de quantités de crédits carbone disponibles pour tenter de faire monter le prix à un niveau conséquent. Ce système EU ETS permet d'obtenir une valeur de prix de CO₂ commune à toute l'Europe, ce qui est nécessaire.

La taxe carbone n'a pas l'inconvénient de dépendre d'un système de marché, mais elle est spécifique à chaque pays et donc non commune aux États membres. La France a proposé des prix indiqués ci-dessus pour une application nationale. Le Royaume-Uni a choisi d'appliquer un minimum du prix de marché (*carbon floor price*) à 18 £ de plus que la valeur de marché de l'ETS jusqu'en 2020.

La COP22 à Marrakech

La COP22 s'est déroulée à Marrakech au Maroc du 7 novembre 2016 au 18 novembre 2016, sous la présidence de Salaheddine Mezouar, ministre des affaires étrangères du Royaume.

La ministre de l'environnement Hakima El Haite avait annoncé par un discours repris par la presse nationale que les trois priorités étaient :

- l'innovation en matière d'adaptation et d'atténuation, avec une focalisation sur l'Afrique et l'agriculture ;
- le développement d'outils opérationnels ;
- le financement des pertes et préjudices.

L'organisation de la réunion était parfaite. La mobilisation nationale était impressionnante. Mohammed VI, Roi du Maroc, a fait deux discours remarquables, il a créé un prix pour le climat et le développement durable et provoqué la réunion des chefs d'État africains le 16 novembre 2016, ce qui témoigne d'une évolution de la position diplomatique du Maroc en Afrique.

La mobilisation de tous les médias a concerné non seulement le Maroc, mais aussi toute l'Afrique et les pays du Sud. L'appel de Marrakech témoigne de cette mobilisation.

Plus de 50 Présidents, Premiers ministres et vice-présidents et plus de 110 ministres et chefs de délégations ont assisté à la COP22. Le principal organe de direction de l'accord de Paris y a tenu sa première réunion.

La COP23 (2017) se tiendra à Bonn en Allemagne.

La rédaction du manuel d'opération de l'accord de Paris a progressé. Les pays se sont engagés à l'achever en 2018. Il devrait permettre un renforcement de la transparence

de l'action, tout particulièrement en ce qui concerne la mesure et la comptabilisation de la réduction des émissions, et les progrès scientifiques et techniques qui doivent être accomplis dans tous les pays pour y parvenir.

Du point de vue financier, le Fonds vert pour le climat (GCF en anglais) considère qu'il est sur la voie de l'approbation d'une allocation de 2,5 milliards\$, à comparer au chiffre de 100 milliards de dollars d'ici 2020 qui est généralement présenté. Le Fonds pour l'environnement mondial (FEM) a annoncé une initiative de renforcement des capacités pour la transparence à hauteur de 50 millions \$. Cette initiative a reçu le soutien de 11 pays développés donateurs, ce qui lui donne un début de réalité. Les pays ont promis plus de 81 millions \$ au Fonds pour l'adaptation. Ils se sont engagés à verser 23 millions \$ au Centre des technologies climatiques (CTCN) pour mettre en œuvre le Mécanisme technologique. Ces montants sont faibles comparés, par exemple, au montant des subventions aux énergies renouvelables en Allemagne d'environ 24 milliards d'€ par an.

Le partenariat NDC est une coalition de pays en développement et développés et d'institutions internationales. Il s'assure que les pays reçoivent le soutien technique et financier pour évaluer leurs capacités de mesurer et de diminuer leurs émissions.

L'initiative Adaptation de l'agriculture africaine a regroupé 27 pays pour traiter les questions d'adaptation climatique dans le cadre des objectifs du développement durable.

Les COP sont le lieu d'initiatives et de déclarations symboliques qui ne sont souvent pas mise en œuvre faute de consensus suffisant, mais qui permettent de faire progresser les opinions des pays. C'est le cas par exemple des questions associées aux femmes et au genre qui jouent un rôle certain dans les différents aspects des conséquences possibles du changement climatique.

L'initiative « De l'eau pour l'Afrique » mise en place par le Royaume du Maroc avec le soutien de la Banque africaine de développement crée des synergies nouvelles, comme d'ailleurs les initiatives pour les bassins et les mégalo-poles. Le « Cadre mondial sur la pénurie de l'eau » va dans le même sens. La question de l'eau, cruciale, doit être impérativement abordée non pas pays par pays, mais bassin hydrologique par bassin hydrologique. La quantité d'eau qui s'évapore chaque jour des océans et qui tombe en précipitations sur les continents varie peu, mais la répartition géographique des précipitations peut changer, la durée et l'intensité des périodes sèches et des périodes humides peuvent également changer, pas nécessairement pour le pire, tandis que la demande de consommation d'eau augmente en particulier pour l'irrigation des terres agricoles. C'est un sujet politique très sensible. Ce sont tout particulièrement les années ou les groupes d'années peu favorables à la production agricole qui provoquent les famines et les crises politiques. Ce sont le développement des bonnes pratiques de culture et d'irrigation et les infrastructures de l'eau (retenues d'eau, transferts) qui permettent d'en limiter les conséquences.

Le *Global Fuel Economy Initiative* et le *Airport Carbon Accreditation Scheme* concernent les transports.

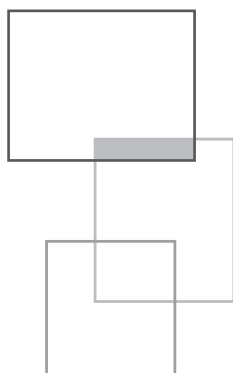
L'initiative Ceinture bleue et l'*African Package for climate-resilient Ocean economies* concernent les océans.

On peut citer l'alliance mondiale pour les tourbières, l'alliance mondiale pour les technologies propres. Un groupe de pays, la *Under2 Coalition* s'est engagé à réduire ses émissions d'au moins 80 % d'ici 2050. Ce groupe inclut l'Allemagne. La « Vision de Marrakech » émise par la réunion du *Climate Vulnerable Forum* engage les pays signataires vis à vis de la communauté internationale à divers objectifs probablement trop larges comme la fin de la pauvreté, etc. Elle propose que les pays s'efforcent d'atteindre une production domestique d'énergie renouvelable en 2050, sans que soit précisé si cela inclut le chauffage et les transports, ni les énergies importées.

Toutes ces déclarations sont utiles car elles amènent les représentants des pays à délibérer, à négocier, et donc à mieux connaître les points de vue des uns et des autres, ce qui est très important. Un nombre croissant d'entreprises, mais aussi de villes ou de territoires prennent également des engagements climatiques.

La prise de conscience collective peut ainsi progresser. Elle permet à chacune et à chacun de mieux comprendre quand et comment nos comportements et nos choix énergétiques individuels et collectifs provoquent des émissions de gaz à effet de serre et quelles sont les décisions qui permettent de diminuer ces émissions.

La modification des choix habituels et des comportements courants est un sujet éminemment politique. Ces changements auront des conséquences industrielles multiples, avec des impacts déterminants sur l'emploi et sur nos modes de vie futurs.



Annexe

Les projections du *Giec*

« Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (*Giec*) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade » (site du GIEC).

À noter : l'acronyme anglais présente un sens un peu différent *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, car le mot « expert » n'est pas explicite.

Le *Giec* a été créé à la demande du G7. L'Organisation météorologique mondiale (OMM/WMO) et le programme des Nations unies sur l'environnement (PNUE) sont impliqués dans la gouvernance du GIEC.

L'idée de ce groupe, ou de ce panel, est de mettre en commun toutes les données mondiales et tous les travaux réalisés (réalisés ou publiés ?) sur le climat et de rendre compte régulièrement de l'état des connaissances sur le climat et ses tendances d'évolution. Depuis 1988, des progrès considérables ont été obtenus, en particulier grâce à des mesures faites dans tous les domaines. La mesure est à la base du progrès de la connaissance.

Les satellites permettent des mesures globales de précision croissante sur l'ensemble de notre planète, qui complètent et raccordent les mesures faites au sol ou à basse altitude. Eumetsat est chargé des satellites météo européens, l'initiative Geoss (*Global Earth Observation System of Systems*), est mené par le *Group on Earth Observations* (GEO) qui réunit 77 pays. La collecte d'information sur les mouvements des océans, sur leur niveau, sur les courants et leurs modifications a été fortement développée. Cette collecte rigoureuse et durable permet de nourrir les modèles de prévision développés et exploités par de nombreuses équipes. Le travail des historiens du climat permet de tester et d'améliorer ces modèles sur de longues durées.

Le GIEC a pour mission de faire la synthèse de ces recherches et des analyses effectuées dans de nombreux domaines et d'établir des rapports pour en rendre compte. Les travaux du GIEC sont partagés en trois groupes de travail (WG), une *task force* et un *task group*. Les activités de chaque groupe de travail sont coordonnées et administrées par l'unité de support technique (*Technical Support Unit*).

Le groupe de travail WG I traite des aspects physiques du système climatique et du changement climatique, en particulier les changements du contenu de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère, les changements observés des températures de l'air, des sols, des océans, de la pluviométrie, du volume des glaciers et des glaces, des niveaux des océans et des mers, des approches historique et paléo-climatique, de la biochimie, du cycle du carbone, des gaz, des aérosols, des analyses satellitaires, des projections climatiques, des causes et attributions du changement climatique.

Le groupe de travail WG II traite de la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels due au changement climatique, des conséquences négatives et positives du changement climatique et des solutions d'adaptation. Il traite aussi des relations entre la vulnérabilité, l'adaptation et le développement durable. Le travail est réalisé par secteurs (ressources en eau, écosystème, alimentation et forêts, systèmes côtiers, industrie, santé humaine) et par région (Afrique, Asie, Australie — Nouvelle-Zélande, Europe, Amérique latine, Amérique du Nord, régions polaires, petites îles).

Le groupe de travail WG III traite des options d'atténuation du changement climatique, en limitant ou en empêchant les émissions de gaz à effet de serre et en développant des actions qui éliminent ces gaz de l'atmosphère, pour tous les secteurs économiques, à court et à long terme. Ces travaux incluent l'énergie, le transport, l'habitat, l'industrie, l'agriculture, la forêt, les déchets. Le groupe de travail analyse les coûts et les bénéfices des différentes approches d'atténuation, en prenant en compte les instruments et les politiques possibles. L'objectif est de proposer des solutions.

La *task force* sur les inventaires nationaux des émissions de gaz à effet de serre développe une méthodologie pour calculer et rendre compte des émissions nationales de gaz à effet de serre et a établi une base de données des facteurs d'émission.

En 2014, le GIEC a parachevé son 5^e rapport d'évaluation qui est constitué des trois chapitres préparés par les trois groupes de travail, d'un rapport de synthèse et d'un résumé à l'intention des décideurs. Ce résumé s'appelle « *Summary for Policy Makers* », ce qui exprime son objectif de fournir un document relativement court pour donner de l'information solide à ceux qui font la politique climatique dans les gouvernements, les régions et les villes, mais aussi pour les grandes entreprises et les ONG, les associations et les journalistes qui ont le rôle essentiel de faire savoir.

La contribution du WG I a été acceptée et approuvée en septembre 2013, et celles des WG II et III en mars et avril 2014, respectivement. Le rapport de synthèse a été examiné et adopté en novembre 2014.

À la différence des rapports précédents, le 5^e rapport d'évaluation met davantage l'accent sur l'évaluation des aspects socio-économiques du changement climatique et ses répercussions sur le développement durable, ainsi que sur les aspects

régionaux, la gestion des risques et l'établissement d'un cadre d'intervention fondé sur des mesures d'adaptation et d'atténuation.

La version intégrale est disponible en anglais seulement. Les chapitres sont les suivants :

- 1. CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2013 - Contribution du groupe de travail I « Les éléments scientifiques »
- 2. CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 - Contribution du groupe de travail II « Incidences, adaptation et vulnérabilité »
 - *Partie A* : Aspects mondiaux et sectoriels
 - *Partie B* : Aspects régionaux
- 3. CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 - Contribution du groupe de travail III « L'atténuation du changement climatique »
- 4. CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 - Rapport de synthèse
- 5. Résumé à l'intention des décideurs

Le chapitre 1 « Les éléments scientifiques » est fondamental car il est à la base de toute la démarche scientifique du GIEC. La table des matières est la suivante :

- Présentation
- Résumé à l'intention des décideurs
- Résumé Technique
- Introduction
- Observations : atmosphère et surface
- Observations : océan
- Observations : cryosphère
- Information provenant des archives paléoclimatiques
- Cycle du carbone et autres cycles biogéochimiques
- Nuages et aérosols
- Forçage radiatif anthropique et naturel
- Évaluation des modèles climatiques
- Détection et attribution des changements climatiques : de l'échelle mondiale à régionale
- Changements climatiques à court terme : projections et prévisibilité
- Changements climatiques à long terme : projections, engagements et irréversibilité
- Élévation du niveau de la mer
- Les phénomènes climatiques et leur rôle dans les changements climatiques régionaux futurs
- Annexes
 - Atlas of Global and Regional Climate Projections
 - Climate System Scenario Tables

- Glossaire
- Acronymes
- Contributors to the WGI Fifth Assessment Report
- Expert Reviewers of the WGI Fifth Assessment Report

La lecture de ce texte du *Giec* est difficile, non seulement du fait de l'extrême complexité des sujets, mais aussi parce que le texte comprend de très nombreuses références (27 pages !) qui ralentissent la lecture sans qu'il soit possible de connaître leur valeur relative. Cependant, le résumé pour décideur est lisible pour quelqu'un qui a une bonne expérience de la modélisation mathématique en général. Le chapitre FAQ est très clair.

« La complexité des modèles climatiques — la représentation des processus physiques comme les nuages, les interactions superficielles, la représentation des cycles globaux du carbone et des sulfures dans beaucoup de modèles — a augmenté substantiellement depuis le premier rapport de 1990 et, en ce sens, les modèles du système terre sont “largement” meilleurs que les modèles de cette époque. Les modèles de climat d'aujourd'hui sont, en principe, meilleurs que leurs prédécesseurs. Cependant, chaque ajout augmente la complexité, si bien qu'en cherchant à améliorer tel aspect du climat simulé, on introduit en même temps de nouvelles sources d'erreurs (par exemple, par des paramètres incertains) et de nouvelles interactions entre les composantes du modèle qui peuvent, probablement seulement temporairement, dégrader la simulation d'autres aspects du système climatique » (traduction non officielle).

On ne peut être plus transparent et modeste.

Et ce chapitre conclut :

« Ainsi, oui, les modèles climatiques s'améliorent et nous pouvons le démontrer par les performances quantitatives mesurées comparées à des observations historiques. Bien que les projections du climat futur ne puissent pas être directement évaluées, les modèles de climat sont largement fondés sur des principes physiques vérifiables et sont capables de reproduire beaucoup d'aspects importants des réponses passées au forçage externe. En ce sens, ils procurent une vision scientifiquement solide de la réponse du climat aux différents scénarios de forçage anthropique ».

La figure A.1 suivante montre les progrès accomplis par les modèles.

Ces deux graphiques présentent la capacité des modèles à simuler la température moyenne et les précipitations pour les trois phases du *Coupled Model Intercomparison Project* notées CIMP 1, CIMP 2, CIMP 3. On voit la corrélation entre observations et modèles. Les valeurs plus élevées indiquent une meilleure correspondance. Les points noirs correspondent à des modèles différents, les gros points présentent la valeur médiane. Le lecteur note immédiatement que les échelles verticales sont très différentes. Les corrélations sont bien meilleures pour les températures que pour les précipitations hydriques.

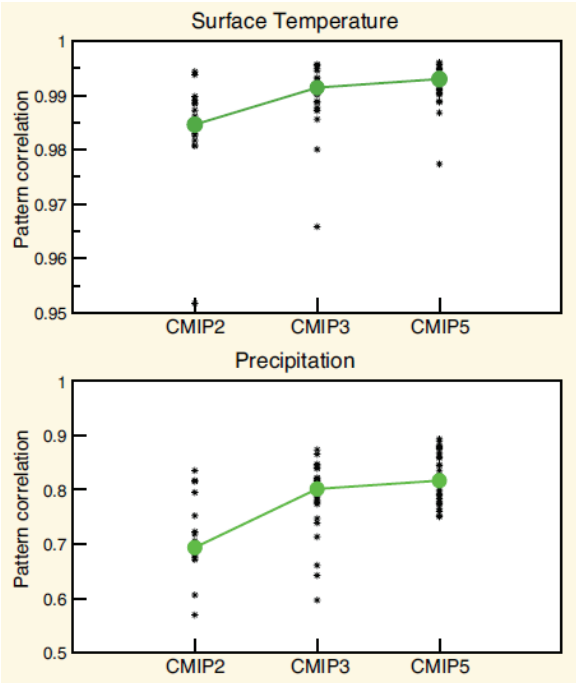


Figure A.1 Progrès accomplis par les modèles mathématiques qui analysent les mesures de températures (en haut) et les mesures de précipitations hydriques (en bas)

L'évolution du climat nous concerne-t-elle vraiment ? On en a parlé au moment de la COP 21, à Paris, puis le sujet a été mis de côté. Ce thème éminemment politique est peu abordé par ceux qui sont chargés de l'action politique. De ce fait, il nous manque un récit collectif qui permette à chacun et collectivement d'organiser notre façon d'envisager notre vie à l'échelon de notre territoire, de notre pays, de notre planète en fonction du climat. Ce livre a pour objectif de participer à l'élaboration de ce récit collectif en partant de l'évolution depuis 1945 de la stratégie énergétique de la France et de l'Europe puis de la lente progression de la prise de conscience de la question du climat entièrement nouvelle pour l'humanité.

Le sujet implique une progression considérable de nos connaissances sur le fonctionnement vraiment complexe de notre planète. Ces recherches coordonnées par le Groupe d'Experts Internationaux sur l'évolution du climat sont décrites. Ce livre aborde plus en détail quelques sujets plus rarement traités comme l'élévation du niveau des mers, l'évolution des ressources en eau, sujet de préoccupation majeure pour beaucoup de pays, le méthane acteur en partie naturel de l'effet de serre, la géo-ingénierie du climat, le coût à attribuer au carbone émis.

Puis la Cop 21, la réunion de Paris, est racontée avec ses aspects diplomatiques et pratiques et sa conclusion, premier pas universel et menacé de solidarité planétaire.

www.edpsciences.org



ISBN : 978-2-7598-2115-0

edp sciences