

Le changement climatique :

perspectives et implications pour le XXI^e siècle

Hervé Le Treut est physicien, directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)¹, qui regroupe neuf laboratoires dont les thématiques de recherche concernent l'environnement global, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'École Polytechnique, et membre de l'Académie des Sciences.

1 Le climat dans lequel se sont développées nos civilisations : une situation très particulière

La question du changement climatique est partie d'une constatation des années 1960-1970 : celui d'un risque de changement majeur dans la composition chimique de l'atmosphère. Anticipée par les travaux de Revelle et Suez (1957), l'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique a été mise en évidence par les mesures régulières menées dès 1958 à l'observatoire du Mauna Loa, dans l'île d'Hawaï. Elle répond à des émissions de gaz à effet de serre qui se sont développées surtout après la Seconde Guerre mondiale.

Cette évolution marque une rupture très forte par rapport aux 10 000 dernières années.

En effet, si des changements importants de la composition chimique de l'atmosphère sont survenus de manière répétée au cours de l'ère quaternaire, les 10 000 dernières années, celles du développement de nos civilisations, ont été globalement très stables en termes de teneur atmosphérique en gaz à effet de serre de longue durée de vie (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote). Elles ont été stables aussi en termes de variations thermiques globales, puisque les estimations des variations de température moyenne indiquent des changements de l'ordre de grandeur des dixièmes de degrés – ce qui est attendu quand on sait que tous les changements importants de température dans le passé ont induit des changements notables de la composition chimique de l'atmosphère.

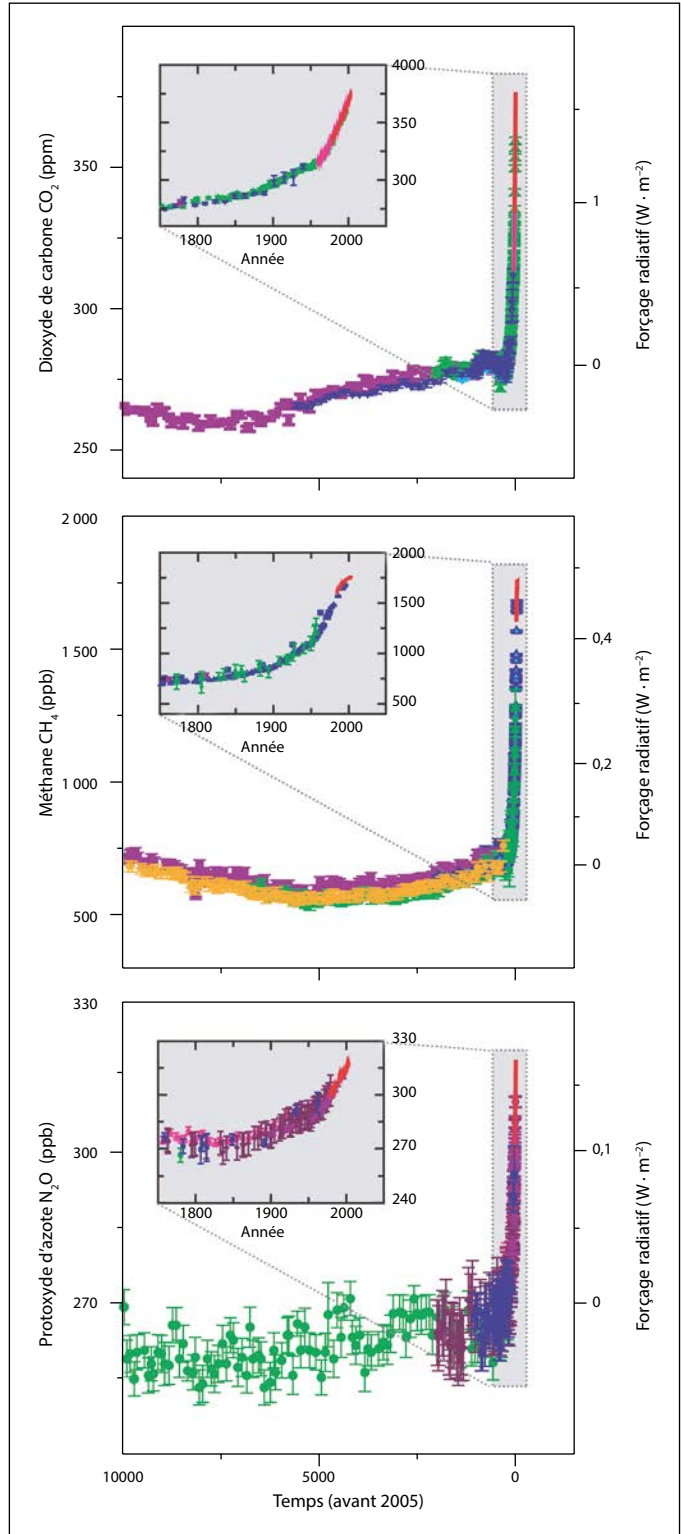
La **Figure 1** montre que la stabilité de la concentration

1. www.ipsl.fr

Figure 1

Variation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 12 000 années : 10 000 ans de « quasi-stabilité » et quelques décennies de changement.
 ppm = partie par million ; ppb = partie par milliard.

Source : IPCC (GIEC) 2007.



atmosphérique en gaz carbonique CO₂, en méthane CH₄ et en protoxyde d'azote N₂O a été remarquable au cours des 10 000 années qui ont précédé l'époque contemporaine. C'est à partir du début de l'ère industrielle que l'on note une évolution, qui devient brutale à partir des années 1950. L'augmentation du CO₂ atmosphérique qui se produit à ce moment s'explique en grande partie (de l'ordre de 80 %) par l'usage des combustibles fossiles : le charbon, le pétrole, le gaz naturel – le reste étant essentiellement dû à la déforestation et aux cimenteries.

La **Figure 2** donne, en gigatonnes (milliards de tonnes), la quantité de CO₂ émise mondialement dans l'atmosphère. On émettait dans les années 1950 de 1 à 2 milliards de tonnes de carbone par an ; on a dépassé le seuil de 3 ou 4 milliards de tonnes dans les années 1970, et au moment du Sommet de la Terre de Rio² en 1992, on émettait 6 ou 7 milliards de tonnes par an. Aujourd'hui, malgré le protocole de Kyoto et les tentatives de lui donner une suite, en particulier à Paris lors de la COP21 en décembre 2015, on est à plus de 10 milliards de tonnes émises annuellement, liées dans une large mesure au développement très fort de l'Est Asiatique.

Deux facteurs sont à prendre en compte pour comprendre les évolutions :

2. Les Sommets de la Terre sont des rencontres décennales entre dirigeants mondiaux organisées depuis 1972 par l'ONU, avec pour but de définir les moyens de stimuler le développement durable au niveau mondial.

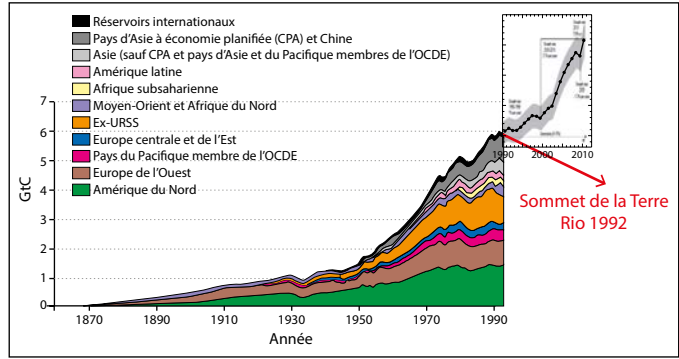


Figure 2

Émissions de CO₂ (en milliards de tonnes de carbone (GtC) par an) liées à l'usage des combustibles fossiles.

Source : International Energy Agency.

– **l'effet de cumul** : les surplus de CO₂ émis dans l'atmosphère qui ne sont pas immédiatement repris par l'océan ou la végétation continentale continuent de s'éliminer, au moins en partie, mais cette disparition est lente. On peut compter qu'au bout d'un siècle, seule une moitié de ce surplus a été résorbée. Ce phénomène explique une accumulation des quantités de CO₂ ;

– **l'effet de l'inertie des océans** : les gaz à effet de serre diminuent l'évacuation de la chaleur provenant du Soleil et entraînent une augmentation des températures à la surface de la planète qui se poursuit tant que l'augmentation associée du flux terrestre infrarouge vers l'espace n'a pas ramené le système terrestre à l'équilibre. Les couches superficielles des océans en interaction avec l'atmosphère comptent quelques dizaines de mètres d'épaisseur, selon la géographie et les saisons. Elles sont le principal lieu de stockage

de cette chaleur et sont à l'origine d'une importante inertie thermique des océans : il faut en conséquences une à quelques décennies pour que le chauffage des océans ne ramène le système Terre à l'équilibre. Il existe donc, une fois les gaz à effet de serre émis, un chauffage inévitable, mais retardé, des océans, qui se produit pendant toute cette phase, et correspond à une forme de « dette climatique ».

Pendant plusieurs décennies, une part des études du climat et du changement climatique a été motivée par la recherche d'une réponse à une question posée dès les années 60 ou 70 : « *Est-ce que les émissions de gaz à effet de serre constituent un danger ?* », que l'on peut prolonger par : « *Est-ce que le risque associé à l'émission massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère justifie une action de prévention ?* ».

2 Présentation de modèles de simulation de l'évolution climatique

Entre les années 1970 et les années 1990, il n'était pas possible d'observer de manière certaine les symptômes de l'action des gaz à effet de serre sur le climat, compte tenu du délai mentionné plus haut entre émission de gaz à effet de serre et réchauffement de la planète, et également parce que les changements induits restaient nécessairement faibles par rapport à la variabilité naturelle du climat. La seule approche possible a été la modélisation climatique. Celle-ci s'appuie sur une compréhens-

sion forte, basée sur des théories autant que des observations, de ce qu'est le système climatique ; elle exige un travail d'équipe considérable. Un modèle comme celui de l'IPSL (**Figure 3**) est fait de sous-modèles, consacrés respectivement à l'atmosphère, aux océans, aux composantes chimiques, biochimiques, aux échanges entre tous ces sous-systèmes. Il a au total mobilisé le travail de plus d'une centaine de personnes pendant plusieurs décennies, pour porter le modèle à maturité. Le développement d'un tel modèle se justifie aussi par toute une série d'autres applications (par exemple prévision à court et moyen termes de l'atmosphère et de la qualité de l'air, de paramètres océaniques tels que courants, salinités et niveau de la mer, ou encore de fluctuations complexes comme les événements El Niño, réponse à des épisodes volcaniques) : toutes participent à la validation de l'ensemble.

Bien sûr, l'IPSL n'est pas le seul au monde à travailler sur les modèles. Il existe mondialement une vingtaine de laboratoires et au moins une quarantaine de modèles. La **Figure 4** illustre un certain nombre des objectifs de la modélisation. Un modèle donné doit être capable, à formulation inchangée, de rendre compte de processus variés, dont certains sont vérifiables, sous une forme événementielle ou statistique, et d'autres correspondent à des projections futures qui ne seront vérifiables que dans quelques décennies. Les exercices de simulation coordon-

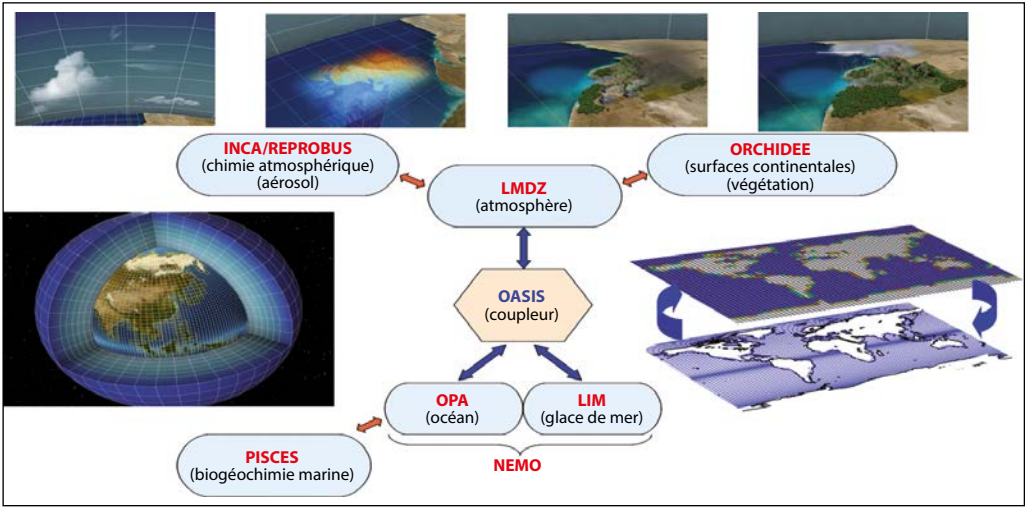


Figure 3

Les modélisations climatiques représentent un travail complexe. Dans le modèle couplé « Système Terre » de l'IPSL, végétation et atmosphère sont des notions essentielles à considérer ; les océans et les échanges entre tous ses paramètres doivent également être pris en compte.

Source : J.-L. Dufresne LMD/IPSL.

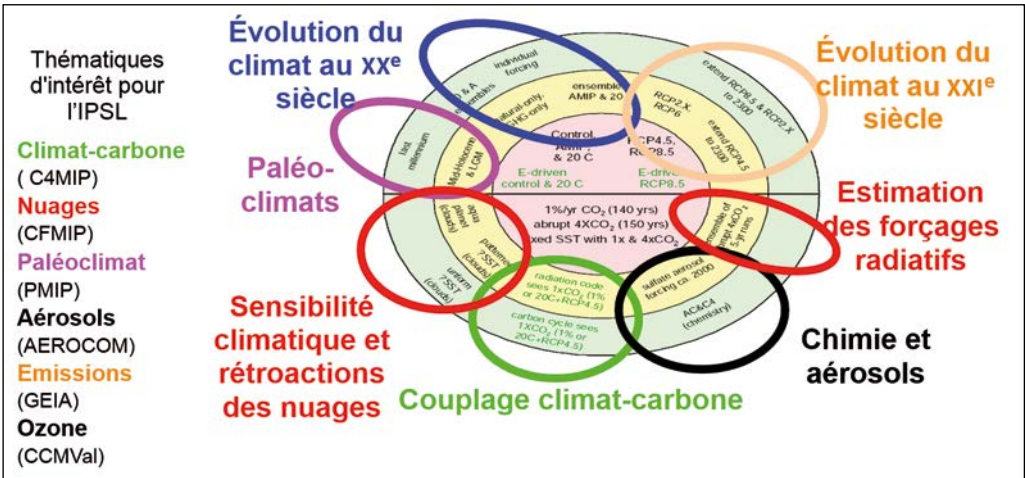


Figure 4

Simulations proposées pour l'expérience internationale CMIP-5. Recherche d'une meilleure appréhension du changement climatique via les 40 modèles de 20 laboratoires internationaux.

Source : J.-L. Dufresne LMD/IPSL.

nés au niveau international correspondent à une forme de mise en compétition des modèles et des instituts. La ligne de mire imaginaire qui

oriente un tel travail serait d'établir un modèle global qui saurait tout faire avec une fiabilité maximale. Il s'agit d'un objectif qui ne sera bien

sûr jamais atteint : la modélisation ne permettra jamais de créer un « clone » numérique de la planète réelle et reste un outil de réflexion, qui vaut par sa capacité à articuler sur un sujet donné des

théories, des observations, et une compréhension générale de la planète, dans le respect d'un grand nombre de lois physiques (voir l'*Encart : « L'élaboration et la vie d'un modèle ! »*).

L'ÉLABORATION ET LA VIE D'UN MODÈLE !

Comment développe-t-on un modèle ?

On le fait d'abord toujours dans un objectif et dans un contexte scientifique précis. Pour un problème donné il existe ainsi ce que l'on appelle une hiérarchie de modèles. Elle comporte des modèles abordant des processus très complexes de manière très ciblée (formation d'un type de nuage spécifique, échange d'eau et de carbone entre le sol, la végétation et l'atmosphère, physique détaillée des échanges radiatifs, processus chimiques et biochimiques détaillés dans l'atmosphère et l'océan) à des modèles « intégrés » associant au contraire en les simplifiant une large série de processus (physiques, chimiques, mais aussi écologiques, sociologiques, économiques) en passant par différents intermédiaires. C'est l'ensemble de ces modèles qui permet d'étudier un problème donné mais nous allons focaliser la suite sur ce que l'on appelle plus fréquemment les modèles climatiques ou modèles du système Terre. Ce sont les modèles les plus complexes, qui représentent l'ensemble des processus, sur un maillage global qui permet de résoudre de manière explicite les processus d'échelle supérieure à quelques centaines de kilomètres, et de manière statistique les processus plus locaux.

Les modèles utilisés pour l'étude du climat et du changement climatique ont avant tout été conçus pour étudier les processus physiques qui régulent le comportement couplé de l'atmosphère et de l'océan à l'échelle globale de la planète. Il s'agit alors de créer une planète numérique qui fonctionne en s'appuyant à la fois sur des lois fondamentales (celles du mouvement) et sur un bilan des échanges et transports d'énergie – cela réclame aussi des équations physiques un peu simplifiées, voire l'usage de lois plus empiriques, lorsqu'il s'agit par exemple de représenter des processus complexes tels que la transpiration de l'eau depuis les sols vers l'atmosphère *via* la végétation continentale.

Il n'existe pas de possibilité de résoudre de manière purement théorique l'ensemble d'équations que tout cela représente. On construit alors une approche numérique, qui correspond à une « maquette » de la planète Terre, où les calculs se font aux nœuds d'une grille de quelques dizaines ou centaines de kilomètres de maille, avec quelques dizaines de niveaux verticaux et un pas de temps de quelques heures, voire un peu moins. En quelque sorte, on « fait vivre » une planète artificielle qui est une « planète bis » par rapport à notre planète réelle. Il existe des possibilités mathématiques variées pour traiter ce problème : pour la moitié des modèles existants, par exemple, les calculs se font dans l'espace des « modes spectraux » de la sphère terrestre, plutôt que dans le monde physique.

La phase suivante consiste à comparer le comportement de cette « planète bis » à celui de la planète réelle. Pour cela, des exercices sont organisés de manières conjointes, sous l'égide du Programme Mondial de Recherche sur le Climat³ pour simuler des processus

3. Programme de recherche sur le climat mondial, mis en place en 1980. C'est une composante de l'Organisation météorologique mondiale, placée sous l'égide des Nations Unies, aussi liée à l'ICSU et à l'UNESCO.

différents, se produisant à des échelles de temps différentes, en utilisant le même code (en l'occurrence, il s'agit de codes de millions de lignes d'instructions).

Exemple : l'évolution du climat au XX^e siècle, dans toutes ses déclinaisons

Simuler correctement le cycle diurne, jour-nuit, avec les nuages, avec tout ce qu'il contient, a été un travail énorme. Simuler le cycle saisonnier, qui met en jeu de manière majeure les circulations océaniques, a aussi demandé de nombreuses années pour être maîtrisé. Mais il faut encore simuler les fluctuations qui concernent des échelles pluriannuelles proches des évolutions climatiques liées aux gaz à effet de serre, comme les fluctuations de type El Niño, et simuler les variations de tous ces aspects au cours de temps plus longs. Ce qu'on appelle « modéliser les évolutions du climat au XX^e siècle », ce n'est pas représenter de manière datée ce qui s'est passé au XX^e siècle, mais c'est comprendre tous les processus qui ont affecté les variabilités naturelles pendant cette période, être capable de les voir se produire dans nos planètes numériques de manière similaire au monde réel – mais avec des dates nécessairement différentes. Cela implique de faire le tri entre les processus qui doivent être retenus dans les équations, et ceux qu'il convient d'éliminer, parce qu'ils jouent un rôle mineur et impossible à représenter aux échelles considérées (les ondes acoustiques par exemple).

Il existe, mondialement, plus d'une vingtaine d'instituts qui ont développé plus d'une quarantaine de modèles, différents mais cousins. Un intense travail de comparaisons de tous ces modèles crée les conditions à la fois d'une coopération et d'une compétition entre instituts. Il n'existe pour le moment pas de modèle clairement supérieur aux autres : certains sont meilleurs pour certains processus physiques, certaines régions du monde, certains climats du passé, mais aucun n'est supérieur dans tous les domaines.

Le problème est complexe, il est aussi évolutif car on veut prendre en compte les résultats émergents qui précisent notre vision des processus dans différents domaines – par exemple la chimie de l'atmosphère, la végétation, le comportement marin ou l'étude des rétroactions des nuages. Pour prendre l'exemple des études de ces derniers, on avait comme indication principale à l'échelle du globe, dans les années 1970, des moyennes en longitude sur trois niveaux (nuages bas, moyens et hauts), provenant d'observations réalisées dans des stations météorologiques depuis le sol. Les données satellitaires, qui se sont progressivement affinées depuis les années 1980, mesurent tous les paramètres des nuages (la taille des gouttelettes, la taille des cristaux, leur altitude) depuis une dizaine d'années et transforment complètement le traitement du problème. Mais on commence donc seulement à avoir à la fois des données précises et un recul statistique suffisant pour vérifier de manière très ciblée le comportement des modèles dans ces domaines.

3 Scénarisation des climats futurs : la limite des 2 degrés à ne pas dépasser

3.1. Prévisions selon plusieurs modèles et scénarios

Les modèles ont été utilisés pour anticiper ce qui se pas-

sera dans le futur, selon plusieurs types de scénarios.

Au-delà d'exercices un peu académiques (impact d'un doublement du CO₂ atmosphérique), les premiers scénarios à vocation « réaliste » ont été établis par le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur

l'Évolution du Climat⁴) (**Figure 5**), qui a réalisé une synthèse des évolutions possibles de tout un ensemble d'éléments à l'origine des changements climatiques (les « *climate drivers* », ou facteurs de climats), mais externes au système climatique lui-même, comme la démographie, les développements technologiques dans le domaine de l'énergie, les types de mondialisation économique... À partir de ces éléments, le GIEC a défini des « scénarios marqueurs », qui ne désignent pas vraiment un « scénario minimal » ou un « scénario maximal », mais décrivent plutôt des évolutions des émissions des gaz à effet de serre cohérentes sur le plan socio-économique – qui ont été largement utilisées dans les rapports 2001 et 2007 du GIEC.

4. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

Dans ce cadre, le scénario « le plus vert » correspondait à des émissions d'un maximum de 10 milliards de tonnes de carbone par an vers le milieu de ce siècle, et décroissantes ensuite sous l'effet spontané des comportements des pays et des individus. Il se trouve que les hypothèses de ce scénario ont déjà été dépassées. À l'autre extrême, des scénarios prévoient un usage toujours croissant de l'énergie fossile. La **Figure 5** en donne un résumé extrêmement bref en présentant la moyenne globale des températures au sol, un paramètre qui résume les très nombreux résultats de ces modèles de manière simple. Cet indice de température globale se révèle très sensible à tout changement de fonctionnement du système climatique, et il fournit une échelle de mesure de l'intensité de ce changement.

La **Figure 5** présente pour chaque scénario les « barres d'incertitudes » (l'extension des lignes verticales situées à droite du diagramme), une donnée majeure que permet l'usage d'un ensemble de modèles différents. Cela fait ressortir la dispersion des prévisions des modèles, qui se situent dans une gamme de plus ou moins un degré environ, de part et d'autre de la moyenne de chaque scénario : les modèles ne permettent pas une prévision précise, mais mesurent une échelle de risque, au mieux de nos connaissances.

Les résultats n'en demeurent pas moins frappants : le scénario vert, déjà dépassé, est le seul qui (pour une petite par-

tie des situations) permet de rester en dessous du seuil de 2 degrés en 2100, mais sans rester stabilisé sous cette valeur. Ce seuil de 2 °C est utilisé dans les négociations internationales sur le changement climatique, depuis la convention de Copenhague. Ce n'est pas un seuil « scientifique » dans le sens où il ne nous protège pas de tout danger – la seule recommandation possible d'un scientifique serait de ce point de vue de ne pas changer le climat – mais il a l'avantage d'avoir été agréé par l'ensemble des pays de la planète comme un niveau de danger qu'il est nécessaire et possible de ne pas dépasser (l'accord de Paris a même demandé d'explorer les possibilités bien en dessous de 2°C). Dans les faits, et en dépit d'une prise en compte large de l'incertitude, tous les scénarios proposés initialement par le GIEC dépassent ce niveau.

Aujourd'hui, on est à un peu moins d'un degré de réchauffement, et le climat, s'il a déjà changé d'une manière qui devient clairement perceptible, reste relativement similaire à ce que l'on a connu en termes de type de fonctionnement (dynamique de l'atmosphère et des océans). Mais un climat de 4 ou 5 °C plus élevé, en revanche, serait aussi différent du climat préindustriel que celui d'un Âge Glaciaire, plus froid du même ordre de grandeur.

L'importance de ces résultats, le fait qu'aucun scénario ne résultant pas d'un effort politique dédié ne permette une stabilisation suffisante du climat, a incité les modé-

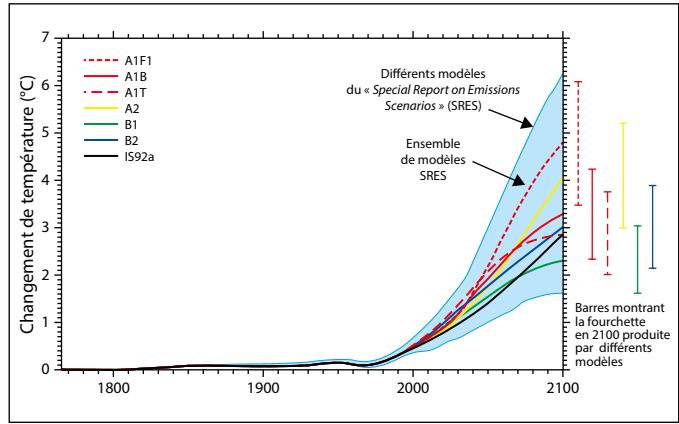


Figure 5

Évolution des variations des températures moyennes mondiales au cours des années observées et calculées par un exercice collectif de « scénarisation » des climats futurs. La limite des 2 degrés est dépassée en 2050, même dans les scénarios les moins alarmants.

Source : GIEC, 2001.

lisateurs à travailler par une « approche inverse ». On fixe un objectif (« Comment faire pour stabiliser le climat sous un réchauffement de 2 degrés ? ») et on utilise le modèle pour calculer ce que cela implique en termes d'émission de gaz à effet de serre (ce qui est possible aussi parce que les modèles comprennent aujourd'hui l'ensemble du cycle du carbone).

La **Figure 6**, basée sur le modèle de l'IPSL, montre les variations de température et les émissions de CO₂ dans l'atmosphère entre les années 1900 et 2100 dans plusieurs scénarios. La partie droite du graphique montre les variations des émissions de gaz à effet de serre associées à chaque cas. Les résultats rejoignent ce que l'intuition peut indiquer. Le fait que le CO₂ émis séjourne longtemps dans l'atmosphère a une conséquence directe : si

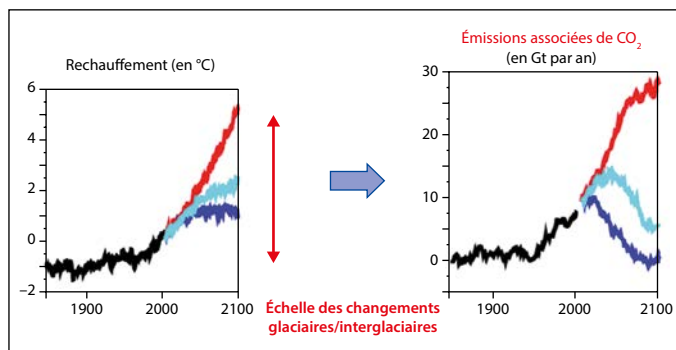


Figure 6

À gauche : variation des changements de températures entre 1900 et 2100 selon les données observées (en noir) et les différentes trajectoires modélisées par l'IPSL ; à droite : les émissions de CO_2 (en Gt/an) entre 1900 et 2100 qui permettent ces trajectoires : pour se stabiliser à 2°C de réchauffement (courbe en bleu foncé), il faut une diminution drastique puis une annulation des émissions.

Source : J.-L. Dufresne, LMD/IPSL.

l'on veut stabiliser la température, il faut fortement diminuer l'émission de CO_2 ! Ce qu'on appelle « l'objectif 2° » (limiter le réchauffement à 2°C en 2100) est en fait extrêmement difficile à réaliser : il impliquera de diminuer de 40 à 70 % les émissions de gaz à effet de serre dès 2050, pour atteindre dans la deuxième moitié du siècle un « équilibre carbone », voire des « émissions négatives », qui impliquent au contraire d'aller reprendre du CO_2 à l'atmosphère.

3.2. Les gaz à effet de serre : lien avec le changement climatique et décisions à prendre

L'analyse de l'ensemble des modèles mentionnés plus haut permet d'établir une corrélation entre un niveau cible de changement de température à la surface du globe et le cumul des émissions de gaz à effet de

serre (exprimés en équivalent CO_2) depuis 1870 (Figure 7). Ce résultat est bien sûr dépendant des modèles, mais il reflète et quantifie une donnée simple et robuste : les excédents de CO_2 (et de plusieurs autres gaz à effet de serre) apportés par les activités humaines restent présents dans l'atmosphère pendant des décennies ou des siècles ; il existe un moment où le total des émissions ne permettra plus de contenir le réchauffement sous un niveau de réchauffement donné. Nos émissions ont atteint un niveau près de dix fois plus élevé que celui de l'immédiat après-guerre. Dans ces conditions, l'indication des modèles est que le temps qui nous reste pour être en situation de ne pas dépasser 2°C (avec 66 % de chance compte tenu de la dispersion des résultats) est d'un peu plus d'une vingtaine d'années. Il ne s'agit que d'un ordre de grandeur, et ce réchauffement se produirait au-delà de ces vingt ans, mais ce calcul montre à quel point les effets possibles du changement climatique concernent un futur proche.

Deux questions se posent alors : quels scénarios de diminution des émissions de gaz à effet de serre doit-on mettre en œuvre pour empêcher un réchauffement trop élevé (on parle de mesure d'atténuation) et quelles seront les conséquences à anticiper selon que l'on s'y tient ou non (on parle alors d'« adaptation au changement climatique », et cela fera l'objet de la section suivante).

Pour répondre à ces questions dans le cadre des négociations en cours, un gros travail

a été effectué pour évaluer ce que seraient des trajectoires d'émission « possibles » compatibles avec l'objectif des 2 °C. Ces trajectoires possibles se doivent de respecter des contraintes variées : cumul des émissions de CO₂ se situant sous un niveau cible autorisé, disponibilité de technologies adéquates, etc. Elles peuvent différer par exemple au travers des hypothèses faites sur le mix énergétique utilisé, sur la date de mise en œuvre de telle ou telle mesure. Tout retard dans la mise en œuvre des mesures de réduction conduit à des réchauffements additionnels.

L'accord de Paris a été précédé d'une phase nouvelle dans les négociations climatiques. Les 195 États qui sont « Parties » de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, et ont donc été invités à la 21^e « Convention de Parties », la COP21, ont été invités aussi à soumettre une « INDC », c'est-à-dire une Intention de Contribution Déterminée Nationalement, explicitant ce qu'ils étaient prêts à accomplir dans le domaine de l'atténuation ou de l'adaptation au changement climatique. Ces intentions portent pour l'essentiel sur la période 2020-2030. Elles seront validées au moment de la ratification de l'accord, et seront ensuite rediscutées (à la hausse seulement) tous les cinq ans.

Un groupe français (le GICN, Groupe Interdisciplinaire d'analyse des Contributions Nationales), parmi plusieurs autres, a analysé la pertinence des efforts anticipés par les différents pays en amont de la

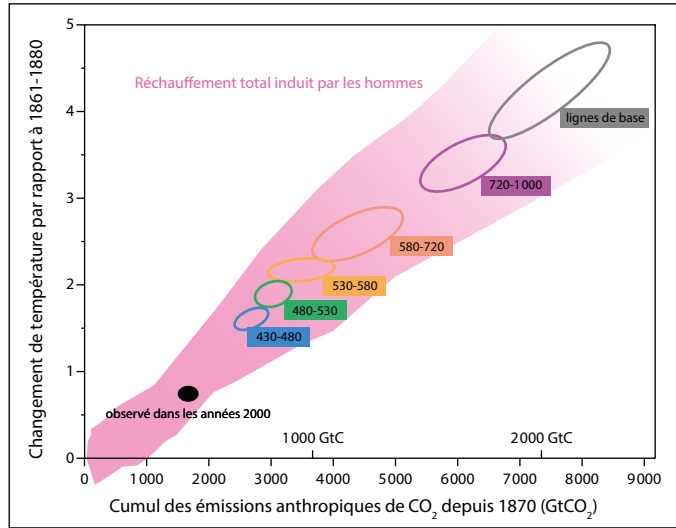


Figure 7

Le réchauffement climatique (en °C) en fonction des émissions cumulées de CO₂ de nature anthropique depuis 1870 (en gigatonnes de carbone ou de CO₂, respectivement Gt ou GtCO₂). Cette relation montre le poids des émissions passées.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

conférence de Paris, en regard des enjeux à long terme de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Si l'on compare aux évolutions attendues sans ces contributions, les réductions qu'elles amènent sont notables, mais elles restent en gros insuffisantes d'un facteur 2 pour se trouver sur les trajectoires compatibles en fin de siècle avec un réchauffement maintenu sous les 2 degrés. La situation est meilleure si l'on autorise le recours à des formes de captations et de séquestration du CO₂ qui peuvent conduire à des émissions négatives.

L'analyse des INDC révèle aussi à la fois l'ampleur des enjeux et les nécessités d'un effort d'analyse importante. Les diminutions d'émissions de gaz à effet de serre néces-

saies tout au long du siècle pour rester sous les 2 °C représentent un effort considérable, amenant à se passer des combustibles fossiles en quelques décennies – effort dont la nécessité a été validée par la conférence de Paris, mais dont les conditions de réalisation restent à définir. Dans ce contexte, on ne peut se limiter au seul CO₂, auquel on résume souvent la problématique des gaz à effet de serre. La **Figure 8** est donnée pour illustrer la complexité des phénomènes qu'il faut maîtriser pour contrôler le réchauffement, pour passer des risques aux actions pratiques. Elle présente les

différentes modifications de la composition chimique de l'atmosphère par les activités humaines et l'estimation du forçage radiatif de la planète associé à chacune ; elle mentionne aussi la présence de gaz polluants, ou encore de particules et d'agrégats de particules qui jouent un rôle plus transitoire mais non négligeable, directement ou *via* leur action sur la couverture nuageuse. Les différents INDC exploitent l'ensemble des actions possibles qui résultent de ces effets multiples. Certaines propositions d'actions sont plus aisées (faire des économies d'énergie, supprimer certaines sources

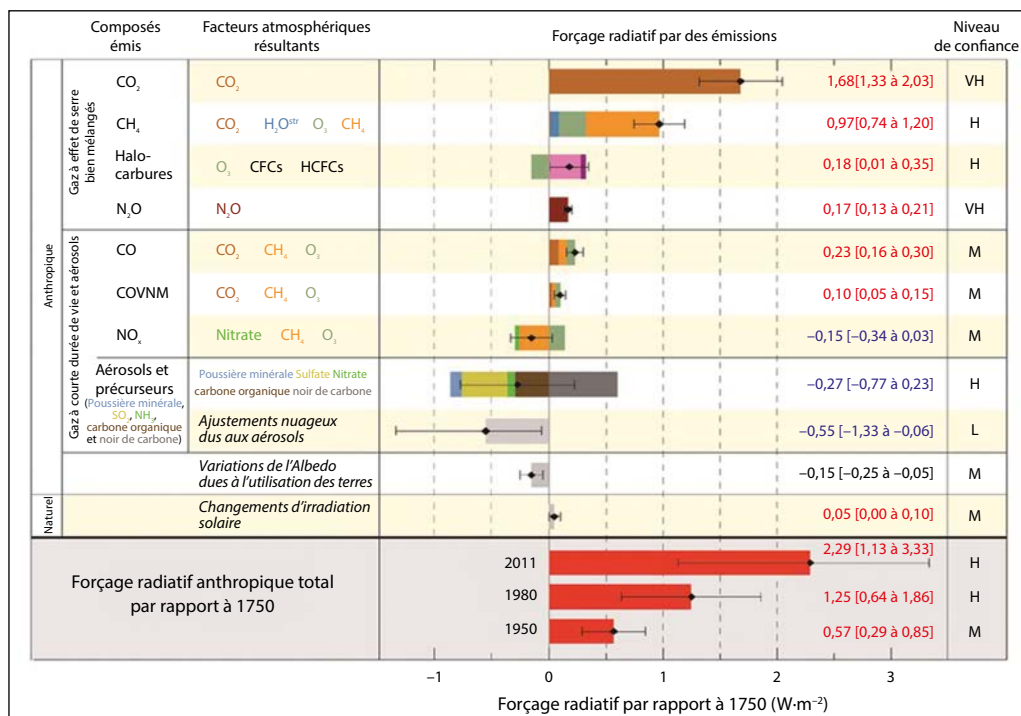


Figure 8

Nature et modification de l'impact radiatif (positive ou négative) des composés émis de manière anthropique dans l'atmosphère montrant la complexité potentielle des politiques de régulation. COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques.

de méthane, agir sur les émissions de noir de carbone, modifier l'usage des sols, etc.). D'autres sont structurelles et très lourdes (remplacer les énergies fossiles par les énergies renouvelables, changer nos infrastructures de transport ou d'habitat) : il est essentiel qu'elles ne soient pas les dernières à être entreprises.

4 Les différents symptômes du changement climatique en fonction de modèles

La difficulté des actions à entreprendre pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C a augmenté la crainte des pays les plus vulnérables, qui, lors de la conférence de Paris, ont porté une demande forte de limitation du réchauffement de la surface du globe à 1,5 °C plutôt que 2 °C, ainsi que des demandes d'aide à l'adaptation et à un développement non carboné. Le réchauffement de la planète a potentiellement des conséquences très profondes sur nos sociétés : elles sont de nature sociale, politique, nationale, internationale, elles touchent les questions d'alimentation, de biodiversité, et bien sûr de changement climatique, etc. Tous ces problèmes doivent être considérés lorsqu'on se préoccupe de l'adaptation au réchauffement de la planète. Cette section est consacrée aux impacts directement liés au changement climatique, et nous élargirons la perspective dans la suivante.

S'il y a une incertitude sur l'amplitude des changements climatiques en réponse à un

niveau d'émissions de gaz à effet de serre donné, il y en a beaucoup moins sur la distribution géographique du réchauffement lui-même, qui fait l'objet d'un consensus large, qui ne s'est pas démenti depuis le rapport Charney.

La **Figure 9** donne la distribution géographique des augmentations de températures de la planète calculé par le modèle de l'IPSL, à droite entre les années 2100 et 1990, pour un scénario bas (2 °C de réchauffement moyen) ou plus fort (plus de 4 °C de réchauffement), et à gauche entre la période préindustrielle et le dernier maximum glaciaire : là aussi le réchauffement est de 4-5° C. Le même modèle a été utilisé pour les deux calculs, en modifiant les paramètres qui sont différents pour ces deux périodes : direction de l'axe de rotation de la Terre, mouvement elliptique de la Terre autour du Soleil, composition chimique de l'atmosphère, topographie des glaciers polaires... Le fait que le modèle reproduise de manière qualitativement correcte les climats du passé conforte son application au calcul des évolutions climatiques futures.

De nombreux calculs ont été effectués avec les modèles proposés par les laboratoires internationaux. Les résultats de la **Figure 10** sont basés sur 32 modèles (RCP2.6, graphique de droite) ou 39 modèles (RCP8.5) qui ont fait le même exercice. Ils estiment les variations géographiques de températures entre deux périodes de vingt années (entre 1986 et 2005 ; entre 2081 et 2100). Les cou-

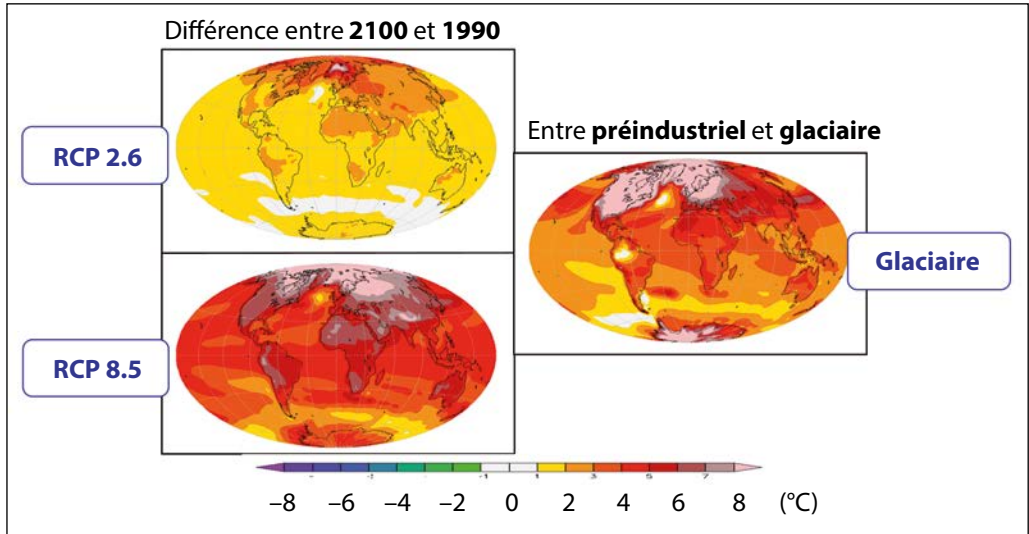


Figure 9

Cartes du monde représentant les changements de températures de surface simulées par le modèle de l'IPSL selon différents scénarios (profils représentatifs d'évolution des concentrations, dit RCP⁹). Le RCP2.6 correspond à un forçage radiatif de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ en fin de siècle, et à un réchauffement moyen de l'ordre de 2 °C . Le RCP8.5 correspond à un forçage radiatif en fin de siècle de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$. L'évolution estimée pour 2100 est alors du même ordre de grandeur que celle qui nous sépare de l'ère glaciaire, telle que simulée par le modèle en accord qualitatif avec les données observées (carte de droite).

Source : IPSL-CM5A-LR.

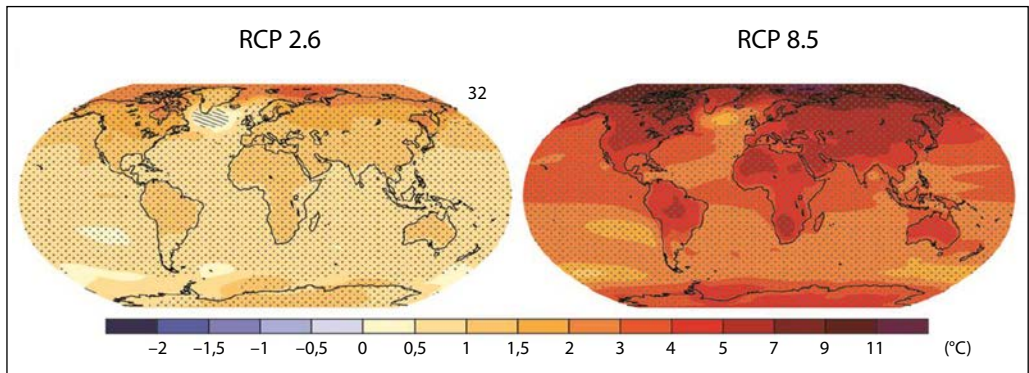


Figure 10

A) Estimation, sur la base de 32 modèles, de la variation de température au sol (entre moyenne 1986-2005 et moyenne 2081-2100) pour une augmentation globale de la température de 2 °C . On calcule un réchauffement important au Pôle Nord provoquant une fonte des glaces ; B) estimation, sur la base de 39 modèles, de la variation de température au sol (entre moyenne 1986-2005 et moyenne 2081-2100) pour une augmentation globale de la température de $4\text{-}5 \text{ °C}$; on ne voit pas de zones épargnées par ce réchauffement et on voit une augmentation de près de 10 °C pour l'Arctique.

5. RCP [Representative Concentration Pathways] : quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, établis par le GIEC, et permettant de modéliser le climat futur.

leurs traduisent la moyenne des modèles. L'importance des gaz à effet de serre se voit par la comparaison des deux diagrammes. Les pointillés manifestent l'accord des modèles en termes de sens des évolutions (le diagnostic de réchauffement est un résultat presque général sur l'ensemble du globe).

Aujourd'hui, on commence à déceler des changements correspondants. Le modèle calcule un réchauffement dont la structure spatiale est voisine de celle que l'on observe : réchauffement plus fort sur les hautes latitudes, plus forts sur les continents. Le large ensemble de modèles, l'analyse de la variabilité observée et simulée, permettent aussi d'estimer la part des changements qui peut être associée à la composante naturelle et imprévisible de l'écoulement atmosphérique, et celle qui résulte d'un changement plus pérenne tel que l'augmentation des gaz à effet de serre. Cette dernière part ressemble beaucoup, en termes de structure spatiale, aux changements observés depuis plusieurs décennies. C'est ce qui a conduit le GIEC à dire, sur la base d'études statistiques quantitatives, qu'il existe 95 % de chances environ pour que les structures du réchauffement observé soient associées aux activités anthropiques. En d'autres termes, on ne sait aujourd'hui expliquer par la variabilité naturelle ces évolutions observées sur des échelles multidécennales qu'avec une probabilité très faible. On peut utiliser aussi le mot de « symptômes » pour ces évolutions parce que nous

savons que nous ne sommes qu'au début d'une histoire beaucoup plus longue. En termes médicaux : tout nous montre que la planète a développé une pathologie susceptible de s'aggraver fortement durant les prochaines décennies. Beaucoup d'autres indices renforcent ce résultat parce qu'ils montrent, comme pour les températures, une coïncidence qualitative entre les simulations des modèles et les premiers changements observés : le refroidissement de la stratosphère, l'élévation de la tropopause, l'évolution des précipitations à l'échelle globale, la fonte des glaciers continentaux, celle de la banquise arctique, les évolutions de la végétation ou des animaux. La notion de risque climatique découle de ces constatations : l'explication de ce qui se passe par l'augmentation des gaz à effet de serre est simple et directe, et elle en rend compte de manière plus complète qu'aucune autre hypothèse envisagée. Ceci n'écarte bien sûr pas la possibilité que d'autres processus puissent jouer un rôle : mais il est impossible d'ignorer le risque important lié aux gaz à effet de serre, et ce risque serait aggravé par l'existence simultanée de variations climatiques naturelles plus importantes qu'anticipé.

Tout ceci ne veut pas dire que l'on sait ou saura tout prévoir. En matière de changements, il y a lieu de distinguer plusieurs types de situations : certains changements sont très directement liés au réchauffement lui-même, mais d'autres sont beaucoup plus affectés par la part

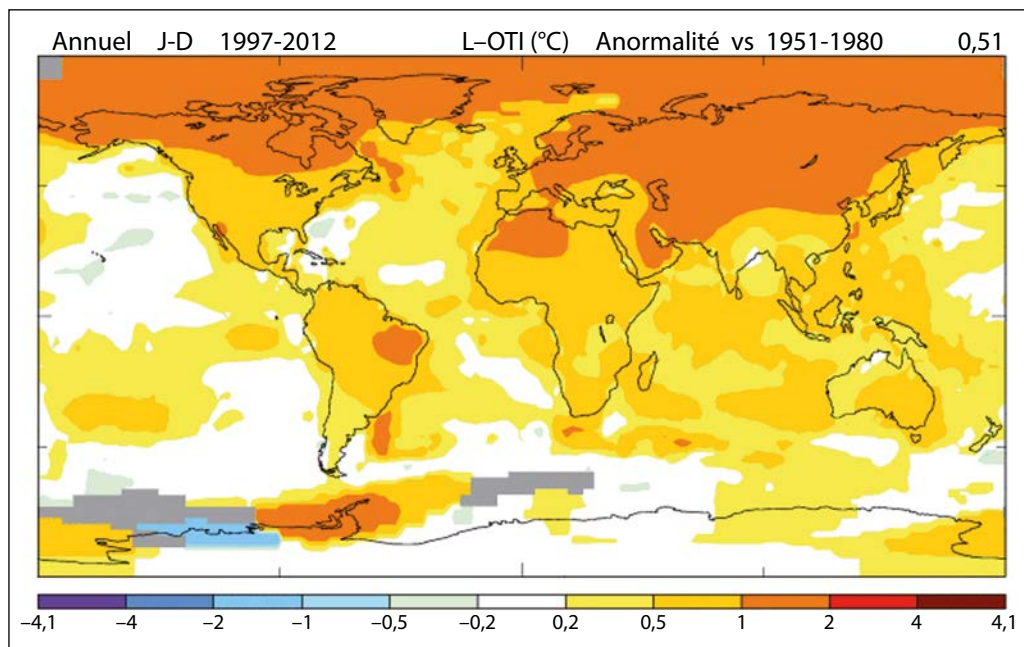


Figure 11

Réchauffement à travers le monde entre [1951-1980] et [1997-2012] : des changements observés en accord avec les prévisions donnant des preuves incontestables du phénomène de réchauffement climatique.

chaotique des mouvements atmosphériques ou des courants marins. L'atmosphère, par exemple, a un comportement suffisamment régulé pour qu'on puisse simuler ses caractéristiques statistiques à grande échelle d'espace et de temps, mais suffisamment chaotique pour qu'il soit impossible de reproduire de manière précise ce qui peut se passer à un moment donné et en un lieu donné. Cette variabilité naturelle du climat peut elle-même être affectée par le réchauffement climatique : on parle alors de « dérèglement climatique » plutôt que de « changement climatique », et de « risques climatiques » associés à ces dérèglements.

Nous pouvons illustrer cela en prenant le cas d'une variable très importante climatique, et très liée aux circulations atmosphériques : la précipitation. La **Figure 12** compare les changements de précipitations, et non de température, correspondant au scénario RCP2.6 (de l'ordre de 2 °C de réchauffement) et au scénario RCP8.6 (de l'ordre de 4-5 °C). Il s'agit donc de moyennes portant sur les résultats de plusieurs modèles et sur des périodes de deux décennies. Bien que ces moyennes filtrent une partie des évolutions aléatoires de courtes durées de vie, les couleurs indiquent des différences modélisées qui sont de l'ordre de 30 ou

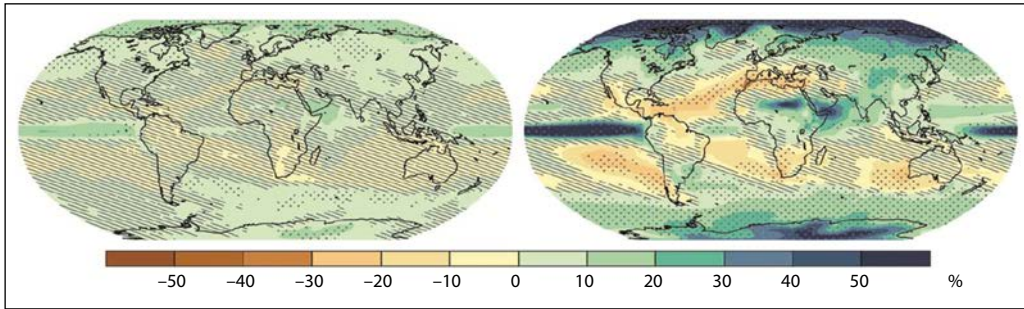


Figure 12

Changements moyens de précipitations de [1951-1980] à [1997-2012] pour un monde plus chaud de 2 °C environ (32 modèles) ou de 4-5 °C (39 modèles). On met en évidence une importante augmentation des précipitations au niveau de l'Équateur et des pôles (couleur bleue), ainsi que des zones en insuffisance avec de probables conséquences sur l'agriculture entre autres (couleur jaune). Les zones en pointillés sont celles où la localisation des changements fait consensus, les zones hachurées celles où elle ne fait pas consensus.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

40 %, ce qui est considérable. Elles tendent globalement à renforcer les contrastes actuels : les zones humides deviennent plus humides, et les zones sèches sud-tropicales deviennent plus sèches. Mais la surface couverte par les hachures sur cette figure montre aussi les zones où les modèles ont du mal à être d'accord entre eux. Ces zones sont peut-être pour une part celles où les modèles ont le plus besoin d'être améliorés. Mais il s'agit surtout de zones où la nature est plus difficilement prévisible, de manière intrinsèque, parce qu'elle a devant elle des choix que le hasard contribuera à arbitrer. Pour bien comprendre l'origine de ce phénomène nous pouvons prendre l'exemple de la région euro-atlantique. On y connaît quatre régimes de temps principaux, marqués par des positions différentes de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande. L'atmosphère oscille en permanence entre ces quatre régimes. Avec le

réchauffement de la planète, nous aurons d'une part une modification des conditions météorologiques propres à chaque régime (pluviosité plus forte, ou sécheresse et canicule plus intense, par exemple, selon les cas) mais aussi une modification de la durée temporelle passée dans chaque régime, qui va dépendre du couplage avec d'autres régions du monde qui sont aussi le lieu de fluctuations naturelles que le changement climatique peut modifier.

5 Le réchauffement climatique : au-delà de la problématique des sciences physiques et chimiques

S'agissant du problème climatique comme de bien d'autres, la notion de risque devient une notion essentielle quand on veut passer d'un message d'alerte à une politique d'actions. Au-delà de l'intensité des phénomènes météorologiques ou clima-

tiques eux-mêmes, le risque dépend de la vulnérabilité du système socio-économique, elle-même liée à l'exposition – selon que des zones concernées sont fortement habitées ou non (Figure 13). Les risques ainsi définis ne peuvent s'appréhender indépendamment d'un ensemble de facteurs très divers (sociaux, liés à la biodiversité, aux filières énergétiques). La notion de risque dépasse donc largement celle d'aléas naturels.

On ne peut donc pas parler d'action sur le climat ou pour se protéger des changements climatiques en restant confiné dans une sphère limitée aux

aspect les plus directs et les plus physiques du changement climatique. D'autres problèmes restreignent l'espace des solutions, et tout le travail de négociations, de maturation, doit conduire à des solutions équilibrées entre plusieurs points de vue. Le diagramme de la Figure 14 est issu du rapport du GIEC et montre l'importance d'itérations fréquentes dans les négociations, dans les prises de décisions, permettant des retours d'expériences et la prise en compte d'observations et de savoirs nouveaux. Nous avons vu que le climat change déjà, qu'il est appelé à

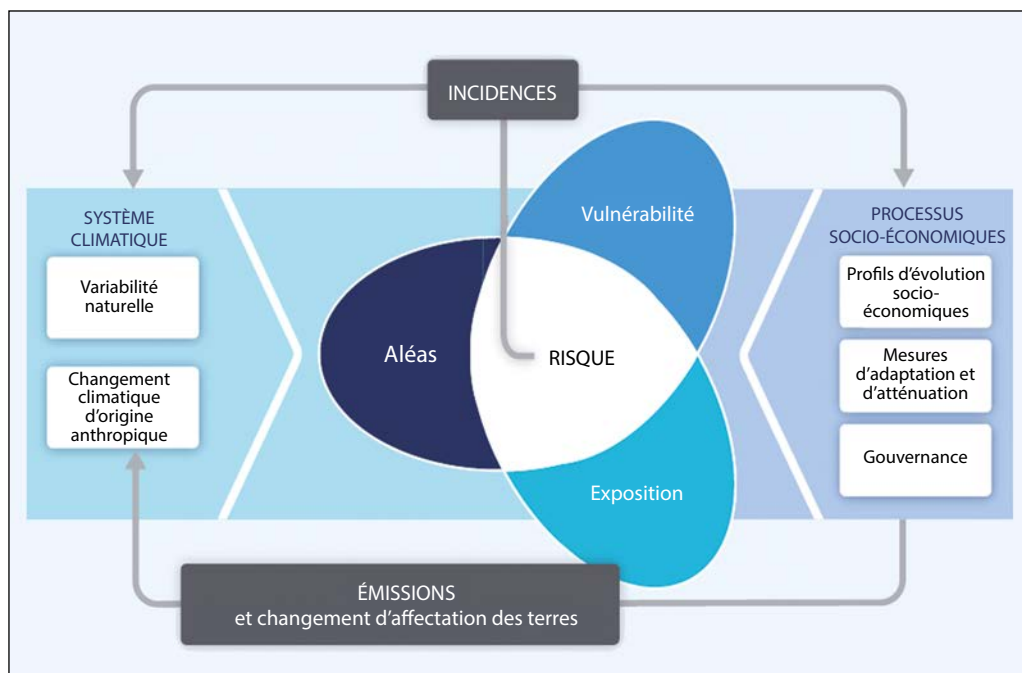


Figure 13

L'analyse des facteurs de risque liés à des événements climatiques extrêmes, par le GIEC : au-delà de la gravité des aléas climatiques eux-mêmes, les évolutions socio-économiques modifient la vulnérabilité et l'exposition à ces aléas. Les questions climatiques sont donc bien plus qu'un simple souci environnemental, que l'on pourrait traiter de manière isolée.

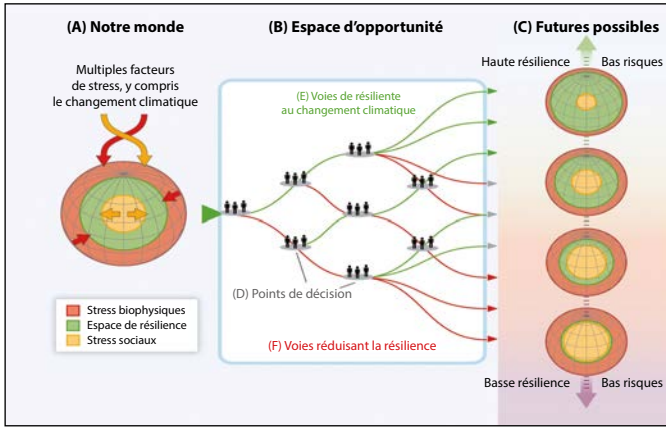


Figure 14

Le processus de prise en compte du changement climatique (GIEC, Groupe 2, 2014). Seul un processus itératif peut permettre de prendre en compte l'ensemble des processus qui entrent en jeu, pour les aligner les uns aux autres.

Source : IPCC (GIEC), AR5, WG2, 2014.

changer de manière amplifiée, et que les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, que l'on appelle d'ailleurs désormais des mesures « d'atténuation », ne pourront pas empêcher la nécessité de « s'adapter » à une part de changement pour partie inévitable. C'est cette nécessité qui donne aussi son importance à la détermination la plus précise possible de la nature des changements climatiques : l'origine des évolutions (gaz à effet de serre, fluctuations naturelles, autres forçages) a une incidence forte sur les mesures à prendre.

L'adaptation pose une autre question, essentielle : jusqu'où est-elle possible ? Le vivant est une illustration de ces limites. Il réagit de manière très rapide au réchauffement, avec des processus très contraints (voir par exemple l'**Encart : « L'influence du chan-**

gement climatique sur les ressources alimentaires »). Pour les animaux comme pour les espèces végétales, la vitesse de déplacement est déterminante (Figure 15). Souvent, ces vitesses sont inférieures aux vitesses attendues de translation des isothermes vers les Pôles (vers le Nord dans notre hémisphère) : l'adaptation sera alors impossible de manière directe. Dans tous les cas la gestion des espèces déplacées pose un problème : doit-on les laisser migrer, accueillir de nouvelles venues dans les aires protégées ? Ces limites à l'adaptation se manifestent dans d'autres domaines : la submersion d'un rivage, au-delà d'un certain niveau de montée des eaux, ne peut pas se traiter de manière douce. Il existe aussi des limites au niveau du réchauffement tolérable. L'adaptation ne peut pas tout résoudre et

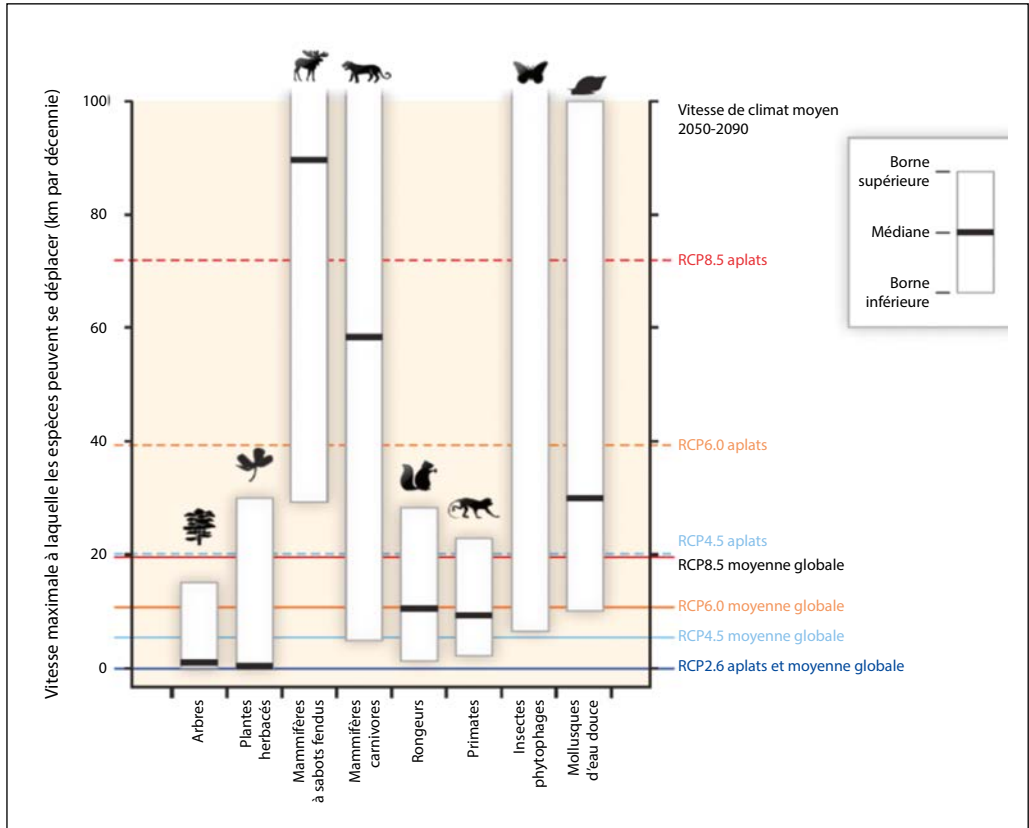


Figure 15

Diagramme des vitesses de déplacements possibles (en km/10 jours) en fonction des espèces : une inégalité sur l'espérance de survie des espèces animales comme végétales impliquant ainsi la disparition de nombreux spécimens pour un réchauffement climatique global de 4-5 °C. Exemples : faibles vitesses de déplacements pour les arbres et les primates mais plus importantes pour les mammifères carnivores, les insectes et les mollusques.

Source : IPCC (GIEC), AR5, WG2, 2014.

ne supprime en rien le besoin de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ces processus d'adaptation touchent dans certaines régions du monde des nécessités vitales (voir aussi l'**Encart : « L'influence du changement climatique sur les ressources alimentaires »**). Mais même dans des régions moins vulnérables, ils constituent un processus social nécessaire d'appropriation et d'analyse des problématiques climatiques et environnementales.

6 Les enjeux de l'adaptation : les besoins d'une expertise à la portée des citoyens comme des décideurs

6.1. Quelle approche utiliser : illustration à partir d'une approche consacrée à l'Aquitaine

Pour donner une image du changement climatique qui soit utile au champ de la décision, il faut sortir du domaine de l'analyse simplifiée des

L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES ALIMENTAIRES

Le changement climatique est susceptible d'entraîner une modification de la capacité agricole des sols et touche donc la production des ressources alimentaires. Il est indispensable de prendre les paramètres démographiques en compte pour évaluer ses effets.

L'exemple de l'Afrique est particulièrement frappant. Le **Tableau 1** donne les estimations de la croissance des besoins alimentaires entre 2000 et 2050 sous l'effet du réchauffement climatique et de la démographie selon les continents. Il est d'un facteur cinq environ, pour l'Afrique. Les situations sont très inégales selon les continents.

Tableau 1

Croissance des besoins alimentaires par continents entre 2000 et 2050 (base 1 en 2000) sous l'effet combiné du réchauffement climatique, de la croissance de la population, de la modification de sa composition (âge, sexe) et du régime alimentaire. On constate des inégalités, et l'Afrique est le continent le plus touché.

Continent	Besoin alimentaire à l'horizon 2050
Afrique	~ 5
Asie	~ 2,5
Europe	~ 1
Amérique latine	~ 2
Amérique du Nord	entre 1 et 1,5
Océanie	~ 1,5

Source : d'après Collomb 1999, FAO, et Benjamin Sultan (résultats présentés de manière arrondie).

Nous subirons des conséquences très inégales face au réchauffement. Dans des régions déjà chaudes, entre -30° Sud et +30° Nord, le facteur d'augmentation de température, à lui tout seul, et quels que soient les changements de précipitations plus difficiles à évaluer, agit de manière négative sur la production primaire de matière végétale. En dehors de ces zones, au contraire, on pourra assister à la croissance des forêts et de la végétation (**Figure 16**).

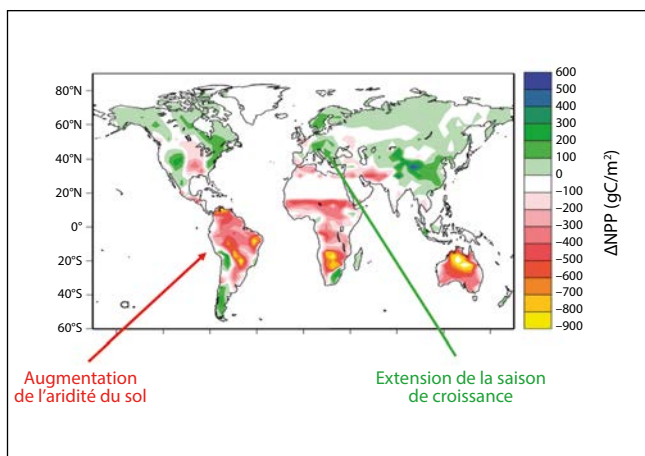


Figure 16

Modélisation simple de la production primaire nette de végétation au travers des continents en réponse au réchauffement, d'après une étude pionnière qui a été suivie de beaucoup d'autres. Elle met en évidence une réponse fortement modulée géographiquement, avec des régions intertropicales affectées de manière très négatives, alors que les régions extratropicales peuvent au contraire voir une croissance augmentée de la végétation.
Source : Berthelot et coll., 2002.

enjeux qui a accompagné la phase d'alerte sur ces problèmes. Les notions clés sont celles de « vulnérabilité » ou de « risque ». Comme tout n'est pas prévisible en détail dans l'évolution climatique future, il convient d'anticiper et de prévenir les situations les plus dommageables. Cette analyse de ce que l'on veut protéger va au-delà des simples critères de la science climatique. On veut par exemple éviter que le changement climatique ne crée des injustices, pour des raisons qui sont d'abord d'ordre éthique, et qui touchent aussi la sécurité de nos sociétés. On veut aussi préserver les ressources de la planète, et au premier rang d'entre elles les ressources de la biodiversité, dont dépendent les êtres vivants que nous sommes.

Il existe pour cela un très large éventail de résultats scientifiques disponibles dans les laboratoires publics, qui sont produit chacun pour un usage et dans un contexte précis, mais qui, tous ensemble, peuvent dessiner un panorama plus large des impacts possibles du changement climatique. Nous citons ici, à titre d'exemple, un travail illustratif de la situation qui prévaut dans de nombreuses régions, qui a été réalisé en Aquitaine. Les conclusions de cette étude sont données dans le livre *Les impacts du changement climatique en Aquitaine* (Presses universitaires de Bordeaux, 19 septembre 2013). Près de 150 chercheurs confirmés ont permis d'aborder dans leur diversité les conséquences du changement climatique sur

l'eau, la vigne, l'agriculture, les forêts, les montagnes, la qualité de l'air, la santé, la biodiversité, la pêche, etc. Un tel travail donne du changement climatique une image documentée aux mieux des connaissances actuelles. Il donne aussi une vision systémique du risque climatique que l'on peut ainsi confronter à d'autres risques, risques sociaux-économiques, ou liés à la biodiversité, à l'alimentation, à la production d'énergie, etc.

L'adaptation au changement climatique met aussi en jeu des échelles de temps particulières, que nous illustrerons ici par un seul exemple : celui du littoral. Il existe de ce point de vue une différence marquée entre le problème de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et celui de l'adaptation au changement climatique. L'atténuation, pour être efficace, doit en effet commencer sans attendre, car les gaz se stockent durablement dans l'atmosphère, sans retour en arrière possible. Mais l'effet de ces gaz est différé dans le temps, en grande partie par l'inertie thermique des océans. Ce délai, limité, offre un temps qui peut être socialement celui de la discussion, de la démocratie, et des recherches collectives de solutions.

En Aquitaine, il existe un littoral lagunaire important, celui de la Gironde. La **Figure 17** donne (en rouge) des estimations⁶ des zones qui risquent

6. Études du laboratoire Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) à Bordeaux.

d'être submergées de manière fréquente, dommageable, par la montée du niveau de la mer. Cette montée, estimée entre 50 et 100 cm en fin de siècle au niveau global, est soumise à des aléas locaux : difficultés du fleuve à s'écouler, étiages⁷ différents, reflétant des pluviométries modifiées ; ou des régimes modifiés de fonte de neige sur les Pyrénées (**Encart : « Changement climatique et débat public : la question des zones inondables »**).

6.2. Éduquer la population : une priorité pour pouvoir prendre les décisions qui s'imposent

Les changements qui sont devant nous nous obligeront à croiser des domaines très différents : le climat, l'énergie, mais aussi l'organisation de nos sociétés face à l'agriculture, la gestion de l'eau, etc. Pour bien traiter ces questions, pour faire comprendre et accepter des choix qui seront souvent des compromis entre plusieurs contraintes opposées, pour donner aussi une force suffisante à l'opinion publique pour qu'elle puisse peser et aider ses élus face à différents lobbies, il faut que les citoyens soient éduqués et comprennent les enjeux, de manière suffisamment précise.

Pour apprécier le chemin à parcourir, on peut s'appuyer sur des enquêtes d'opinion, telles que celle qui est réali-

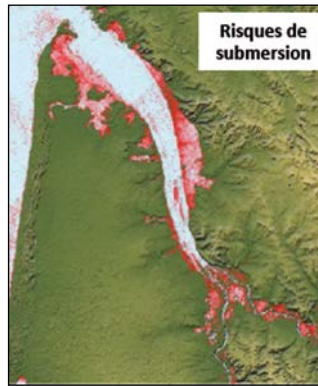


Figure 17

Estimations des zones qui risquent d'être submergées par la montée de la mer au niveau de la Gironde.

Source : Bruno Castelle, EPOC/CNRS/Université de Bordeaux.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DÉBAT PUBLIC : LA QUESTION DES ZONES INONDABLES

Face à des zones menacées de submersions, que faire ? La réponse est souvent : rien, par passivité, incapacité à prendre des décisions, ou au contraire de manière calculée. Le risque est alors de voir disparaître en quelques dizaines d'années des zones de travail et d'habitat, imposant une migration forcée aux populations concernées. À contrario, protéger ces zones menacées peut imposer des travaux importants, et réclame des décisions collectives, comprises et acceptées par les citoyens.

Il y a par exemple, en Aquitaine, une côte sableuse protégée par des dunes. Elle est soumise à un mécanisme d'érosion, qui est très marqué lors des tempêtes, tempêtes dont la modification en réponse au changement climatique constitue un aléa difficile à évaluer. L'état des dunes est donc un facteur de protection très important, et le Conservatoire du Littoral a accompli au cours des dernières décennies un travail remarquable de restauration de ces paysages très fragiles. Encore faut-il être du bon côté de la dune. Cette question se pose par exemple à Lacanau, une ville qui n'est plus protégée par un cordon dunaire, et devrait reculer pour ne pas être soumise à des risques trop importants. Plus au Nord la région du Verdon pose des questions analogues, dans un contexte géographique un peu différent à l'abord de l'estuaire de la Gironde, questions mises en lumière par l'abandon nécessaire du bâtiment « Le Signal ».

Ce qu'impose l'aléa climatique, ce sont donc des politiques de vigilance, de réduction des risques, de restauration des zones littorales, de maîtrise des constructions, d'abandon des zones les plus dangereuses. Bien sûr le diagnostic scientifique n'est qu'un des facteurs de décision. Mais on estime parfois qu'il y a 7 millions d'habitations en zones inondables en France. Le changement climatique impose à cet égard un facteur supplémentaire de vigilance.

7. Étiage : correspond statistiquement (sur plusieurs années) à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.

sée annuellement par Daniel Boy du Centre de Recherches Politiques de Sciences Po, anciennement Centre d'Études de la Vie POLITique Française (CEVIPOF) de Sciences Po, et par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Elle montre qu'une très large partie de l'opinion est désormais consciente de l'existence d'un problème climatique et le considère spontanément comme un problème majeur. Mais quand vient une ques-

tion ouverte plus précise : « *En quoi consiste selon vous l'effet de serre ?* », 14 ou 15 % de la population seulement répond en évoquant l'existence de gaz, de CO₂ (Tableau 2). Malgré les efforts marqués de l'Éducation Nationale on est manifestement encore très loin d'une compréhension des enjeux suffisante pour que l'opinion publique puisse être à un niveau suffisant l'un des appuis des décideurs dans la mise en place des transitions nécessaires.

Tableau 2

Les résultats du sondage à la question « *En quoi consiste selon vous l'effet de serre ?* » mettent en évidence un grand besoin d'éducation de la population en France et ailleurs sur les problèmes environnementaux.

Intitulé de la catégorie	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
La pollution, les déchets	11	15	18	24	21	25	24	23	24	20	20	28	28	27
Couche d'ozone	19	15	27	22	24	25	26	24	25	23	21	22	23	23
Des gaz, le CO ₂	12	14	10	13	13	14	12	17	17	17	16	14	14	12
Chaleur, rechauffement	22	25	21	18	16	13	18	18	16	21	17	18	16	18
Autres réponses	5	3	4	3	5	3	4	3	3	5	6	3	3	5
Le manque d'air	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
Sans réponse	30	27	19	19	20	19	14	13	13	12	19	14	15	14

Source : Daniel Boy, Sc. Po. Cevipof 16 (04/2013).

Pour un partage démocratique des décisions

Pour traiter les problèmes du changement climatique de manière cohérente et efficace (c'est vrai pour la France, c'est vrai pour l'ensemble des pays de la planète), l'éducation à la compréhension plus profonde des enjeux est capitale. Elle doit accompagner la transition entre une phase d'alerte et une phase de

prise de décisions, de recherche de solutions, qui réclame des choix complexes.

Aujourd'hui, de nombreuses enquêtes le montrent, la compréhension de ces problèmes, malgré des avancées importantes, reste insuffisante. Une appropriation de ces enjeux par l'opinion publique est nécessaire, car elle conditionne des décisions qui seront nécessairement des décisions de compromis compliqués entre des contraintes sociales et environnementales opposées, mais aussi des décisions prises face aussi à des intérêts et des lobbys qui ne représentent pas l'intérêt public. Les scientifiques ne peuvent pas décider à la place des citoyens et des élus. Mais ils ont un rôle et une responsabilité considérable en termes de médiation scientifique, d'éducation et d'évaluation des mesures qui seront prises à la suite de la COP21. L'éducation formelle, à l'école, au lycée, à l'université ou dans les entreprises, joue un rôle très important. Mais l'échelle territoriale, celle de collectivités locales où chacun peut s'impliquer, doit elle aussi contribuer fortement, et par l'exemple, à cette formation nécessaire des citoyens.