

INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

**FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE,
LE CHAMP DES POSSIBLES**

Colloque de l'Académie des sciences

28-29 janvier 2020

SYNTHÈSE MULTIMEDIA

Un article récent du journal *Libération* titrait « Les savants flous ». L'image de la science dans le public a été considérablement perturbée par l'épidémie de Covid. Tout à coup, en l'espace de quelques semaines, le monde a pris conscience que la science n'est pas faite que de certitudes. Pire encore, des experts de toutes natures, dont certains scientifiques éminents, ont exposé des points de vue contradictoires. Depuis quelques décennies, la science avait mauvaise presse et on lui prêtait beaucoup de maux, souvent de manière irrationnelle, OGM, énergie nucléaire, vaccins etc. Mais on croyait encore à la vérité scientifique : des savants, parfois vus comme des apprentis sorciers, élaboraient des théories certes indiscutables mais dont les applications pouvaient parfois aller à l'encontre du bien public. Et voilà que des désaccords entre scientifiques apparaissent au grand jour.

Pourtant les scientifiques le savent bien : depuis toujours, la recherche est faite de débats entre opinions différentes, qui tendent vers une forme de vérité jamais véritablement atteinte. On ne compte plus les exemples de querelles dans toutes les sciences. En physique, le débat a fait rage à l'Académie des sciences autour de l'existence des atomes. En biologie, c'est la théorie de l'évolution ou les microbes qui ont été mis en question. Dans les sciences de la Terre, la tectonique des plaques a mis très longtemps avant d'être acceptée, et l'origine du réchauffement climatique était encore très récemment l'objet de débats houleux. Même la science mathématique, pourtant le temple de la vérité, n'est pas exempte de ce genre de questions et a dû affiner le concept de vérité. Le théorème de Pythagore est vrai dans la géométrie euclidienne qu'on enseigne à l'école mais devient faux dans la géométrie hyperbolique très utilisée aujourd'hui dans la recherche mathématique. Dans chaque discipline le mot « vrai » a un sens extrêmement précis, bien connu des spécialistes, mais qu'il faut expliquer au néophyte. La théorie de la gravitation de Newton a été détrônée par la théorie de la relativité d'Einstein mais elle n'en demeure pas moins vraie et utile dans d'innombrables situations, de même que les théories modernes de la gravitation

précisent celle d'Einstein. Il ne faut bien sûr pas en conclure que la vérité scientifique est relative et que ses conclusions ne sont pas solides. La théorie de l'évolution, la tectonique des plaques, ou le réchauffement de notre planète ne seront plus jamais remis en question : ce sont des faits acquis et désormais indiscutables. Les points qui sont en discussion sont des faits « nouveaux », comme l'apparition d'un virus, qui se transformeront par la suite en « vérité scientifique » après le passage par une polémique souvent constructive. C'est sur le front de la recherche que les luttes et les discussions ont lieu. A l'arrière, le terrain est sécurisé et c'est tant mieux !

Les scientifiques ont une grande part de responsabilité dans cette image faussée de leurs disciplines. Le plus souvent, ils se gardent bien de montrer publiquement leurs désaccords et ils n'expliquent que rarement la méthode scientifique, faite d'essais et d'erreurs. Ils aiment montrer les succès et cachent les chemins tortueux qu'ils ont suivi pour y parvenir. Les manuels scolaires racontent la gloire d'un Le Verrier qui découvre la planète Neptune « du bout de sa plume », comme disait Arago, en faisant des calculs de mécanique céleste, mais ils oublient de dire que le même Le Verrier, entraîné dans sa lancée, a « découvert » par la suite une autre planète... qui n'existe pas (et qu'il a même baptisée Vulcain). Il est vrai que, très lentement, la communauté scientifique a pris conscience de la nécessité de la diffusion des sciences, pas seulement comme une liste de résultats magnifiques, mais aussi comme un ensemble d'hypothèses et de conclusions provisoires qui sont en cours de validation, parfois contradictoires. En quelque sorte, le petit Corona virus est semblable à l'enfant du conte d'Andersen qui crie que le roi est nu : l'épidémie a forcé subitement les scientifiques à se dévoiler et à montrer publiquement la complexité de leur monde. C'est dommage car la science en train de se faire est encore plus belle et passionnante quand elle est mise à nu.

La question du climat est analogue, mais sur une échelle de temps différente. Il a fallu trois semaines

aux Français pour comprendre ce qu'est une épidémie, un virus, ou une zoonose, mais il leur a fallu trente ans pour comprendre ce qu'est le réchauffement climatique et l'effet de serre. Les débats entre climatologues ont été violents et lorsque le public en a pris connaissance, il a souvent conclu que la science est décidément floue, qu'elle est incapable de prédire l'avenir, et que les experts ne sont pas d'accord. Là encore, les scientifiques ont une part de responsabilité. Ils n'ont que rarement été capables d'expliquer la complexité des problèmes, le grand nombre de vérités indiscutables, mais aussi le caractère non définitif de certaines conclusions en cours de discussion. Les médias ont tendance à oublier les consensus et adorent mettre en avant les désaccords.

S'il n'avait pas de science, nous n'aurions pris conscience que trop tard du réchauffement climatique. Il ne s'agit en effet que de quelques fractions de degrés chaque année, immergés au milieu de variations de températures plus importantes, essentiellement aléatoires : le phénomène ne devient sensible qu'au long terme. Si on n'avait pas inventé le thermomètre, qui aurait pu dire avec certitude qu'il fait plus chaud aujourd'hui qu'il y a cent ans ? La science a joué le rôle de lanceur d'alerte, avant la catastrophe.

Le colloque « Face au changement climatique, le champ des possibles » est une tentative pour remédier à ce problème. Il s'agit de proposer au public un état des lieux de ce qui est acquis et solide, mais aussi de ce qui est en train de se faire, et de ce qu'il faudrait faire à l'avenir pour éviter le pire. Ce n'est pas facile car le fonctionnement du système Terre est extrêmement complexe et sa compréhension met en jeu à peu près toutes les sciences : physique, météorologie, climatologie, astronomie, chimie, géologie, biologie, sans oublier les mathématiques, toujours utiles. Chacune de ces sciences fonctionne à des échelles de temps et d'espace qui leur sont propres. La géologie avec ses millions d'années, la climatologie avec des dizaines d'années, ou la météorologie pour laquelle on parle plutôt de



jours. Les unités d'espace aussi sont très variées, des dizaines de milliers de kilomètres jusqu'à des tailles microscopiques, par exemple pour la physique des nuages. Tout cela interagit de manière compliquée et n'est certainement pas facile à expliquer au grand public. On est bien loin de la science de Galilée facile à comprendre qui permet de prédire avec précision le temps que met un caillou pour tomber du haut de la tour de Pise. Aujourd'hui, on peut prédire sans problème la position de la Lune dans mille ans à quelques mètres près, mais on a compris qu'une telle précision serait illusoire s'il s'agissait d'un million d'années. De la même manière, on peut prévoir avec une très bonne probabilité s'il pleuvra demain, mais il est presque impossible de savoir s'il pleuvra dans un mois. Quel sera le climat dans cinquante ans ? C'est cette complexité, associant certitudes et probabilités, qui est difficile à transmettre au public général.

L'enjeu est important. La communauté scientifique a le devoir de communiquer au public l'état des connaissances, en insistant à la fois sur des faits bien établis et sur les problèmes qui restent en suspens ou qui font l'objet de débats. Une fois le public informé de la situation, il revient à la société entière, représentée par ses élus, de prendre des décisions. Les élus doivent également prendre en compte d'autres éléments, de nature économique ou éthique par exemple. Cela s'est illustré de manière très claire récemment à l'occasion du confinement imposé à la population : la science ne peut être que l'un des arguments utilisés par les politiques. Ce n'est peut-être que l'un des arguments, mais il est essentiel.



Mardi 28 janvier

Session I - Face au constat, quelles solutions

Président de séance : Étienne GHYS

- ➔ **Réchauffement climatique : état des lieux, causes, impacts, risques** P. 5
Valérie MASSON-DELMOTTE, *physicienne, Institut Pierre-Simon Laplace*
- ➔ **Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision** P. 6
Henri WAISMAN, *économiste, Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri)*
Céline GUIVARCH, *Directrice de recherches, Ecole des Ponts ParisTech*
- ➔ **Anticiper l'évolution des territoires** P. 8
Hervé LE TREUT, *climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace, Académie des sciences*
- ➔ **Débat** P. 9
Animé par Didier ROUX, *physico-chimiste, Unitec, Fondation la Main à la Pâte, Académie des sciences*

Session II - Changement climatique, risques et enjeux

Président de séance : Jean-Claude DUPLESSY

- ➔ **Changement climatique, risque et enjeux : le rôle des observations** P. 11
Anny CAZENAVE, *géophysicienne, Observatoire Midi-Pyrénées, International Space Science Institute, Académie des sciences*
- ➔ **L'océan de l'anthropocène** P. 12
Jean-Pierre GATTUSO, *océanographe, Observatoire océanologique de Villefranche, Iddri*
- ➔ **Modèles et projections** P. 13
Olivier BOUCHER, *climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace*
- ➔ **Évolution des technologies des données : opportunités et défis pour la simulation et l'analyse du système Terre** P. 14
Venkatramani BALAJI, *géophysicien, Princeton University, Institut Pierre-Simon Laplace*
- ➔ **Évènements extrêmes** P. 15
Sonia SENEVIRATNE, *climatologue, ETH Zurich*
- ➔ **Changement climatique et biosphère** P. 16
Isabelle CHUINE, *écologue, Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE)*
- ➔ **Débat** P. 17
Animé par Didier ROUX, *physico-chimiste, Unitec, Fondation la Main à la Pâte, Académie des sciences*

Mercredi 29 janvier

Session III - Transitions: adaptation et réduction des émissions de gaz à effet de serre : trajectoires de développement résilientes et vers le zéro carbone

Président de séance : Sébastien BALIBAR

- ➔ **Energie et climat : des défis communs dans le passé comme dans l'avenir** P. 20
Didier ROUX, *physico-chimiste, Unitec, Fondation la Main à la Pâte, Académie des sciences*
- ➔ **Conditions économiques et sociales du déclenchement de la transition bas carbone** P. 21
Jean-Charles HOURCADE, *économiste, Ecole des hautes études en sciences sociales, Ecole des Ponts ParisTech*
- ➔ **Décarboner le transport: véhicules électriques ou à hydrogène, transport aérien, transport maritime** P. 22
Nicolas MEILHAN, *ingénieur, France stratégie*
- ➔ **Captage et stockage du CO₂** P. 23
Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL, *ingénieure géologue, BRGM, service géologique national, CO2GeoNet*
- ➔ **Bâtiment et urbanisme** P. 24
Vincent VIGUIÉ, *ingénieur des Ponts eaux et forêts, Ecole des Ponts ParisTech*
- ➔ **Utilisation des terres et changement climatique : agriculture, alimentation, énergie** P. 25
Jean-François SOUSSANA, *ingénieur agronome, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)*
- ➔ **Débat** P. 26
Animé par Didier ROUX, *physico-chimiste, Unitec, Fondation la Main à la Pâte, Académie des sciences*

Session IV - Production d'énergie décarbonée et stockage ; conclusion

Président de séance : Jean JOUZEL

- ➔ **Les énergies renouvelables : production, ressources, intermittence, coûts, durabilité** P. 28
Philippe MALBRANCHE, *ingénieur, Institut national de l'Energie Solaire*
 - ➔ **Énergie nucléaire : atouts et faiblesses, nécessité d'une approche intégrée** P. 29
Yves BRÉCHET, *physicien, Monash University, Mc Master University, Saint Gobain*
 - ➔ **Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?** P. 30
Jean-Marie TARASCON, *chimiste, Collège de France, Académie des sciences*
 - ➔ **Changement climatique et éducation** P. 31
Pierre LÉNA, *astrophysicien, Office for Climate Education, Académie des sciences*
 - ➔ **Le changement climatique, une chance pour l'humanité?** P. 32
Mireille DELMAS-MARTY, *juriste, Collège de France, Académie des sciences morales et politiques*
 - ➔ **Débat final** P. 33
Animé par Didier ROUX, *physico-chimiste, Unitec, Fondation la Main à la Pâte, Académie des sciences*
 - ➔ **Échanges entre étudiants et scientifiques** P. 34
 - ➔ **Conclusions et clôture** P. 35
SAS le Prince Albert II, *Prince souverain de Monaco*
Laurent FABIUS, *président du Conseil constitutionnel*
- Étienne GHYS, *mathématicien, CNRS, Ecole Normale Supérieure (Lyon), Académie des sciences*



Session I - Face au constat, quelles solutions

Le changement climatique est enclenché et se poursuivra plusieurs dizaines d'années, mais l'objectif défini lors de la COP21 était de contenir ce réchauffement à +1,5°C d'ici 2100. Cela permettrait de limiter les conséquences sur la dégradation de la biodiversité, les événements météorologiques extrêmes, les réserves en eau douce, les rendements agricoles, la fonte des glaces continentales et polaires... Tous les acteurs, de tous les secteurs, de tous les pays doivent multiplier leurs efforts en ce sens pour mettre en œuvre les solutions nombreuses qui existent déjà et en inventer de nouvelles. Les priorités concernent principalement à décarbonner quatre secteurs : les transports, l'habitat, l'industrie et l'agriculture. En jouant à la fois sur des productions énergétiques décarbonnées et le stockage du CO₂ on peut essayer d'atteindre en 2050 des émissions nettes de CO₂ qui soient nulles au niveau de la planète. Cela implique de combiner adaptation et baisse d'émissions, pour chaque grand système de production, et la maîtrise de la demande.

Il y a une urgence à agir car un tel scénario suppose une réduction de 50% les émissions de CO₂ d'ici 2030, ce qui exige des transformations majeures de nos sociétés dans des délais inédits. Ne pas le faire exigerait des générations à venir de fournir des efforts colossaux pour obtenir des émissions nettes négatives de CO₂. Plus les pays tarderont à réduire drastiquement leurs émissions, moins ils disposeront de marges de manœuvre pour le faire. La question est donc posée de la possibilité d'atteindre cet objectif, mais quoiqu'il en soit des efforts doivent être mis en œuvre dès maintenant si on ne veut pas voir la situation s'aggraver.

Dans cette perspective, la gestion des territoires s'avèrera complexe et les arbitrages seront difficiles pour déployer des solutions qui répondent aux enjeux sans impacter outre-mesure les populations les plus fragiles. La transition énergétique doit être juste pour obtenir l'adhésion sociale qui lui est nécessaire. L'appui de la science, dont les connaissances et les outils sont aujourd'hui suffisamment robustes pour éclairer la décision publique, est déterminant.

présidé par
Étienne GHYS,
mathématicien, CNRS,
Ecole normale supérieure de Lyon,
Académie des sciences





Valérie MASSON-DELMOTTE
Physicienne, Institut Pierre-Simon Laplace

Réchauffement climatique : état des lieux, causes, impacts, risques

VOIR L'INTERVENTION 

fement climatique. Depuis plus de trente ans, des milliers de chercheurs issus de toutes les disciplines à travers le monde n'ont cessé d'affiner leurs travaux pour mieux déterminer les origines, l'ampleur et les évolutions possibles de ce réchauffement. Dans ce cadre, le groupement international d'experts sur le climat (GIEC) a pour mission de confronter les études entre elles afin d'en évaluer les limites et la robustesse, de les synthétiser avec rigueur, exhaustivité et objectivité afin d'en consolider les connaissances et de les partager.

Il est ainsi clairement établi que le réchauffement actuel du climat est dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre, lesquelles se sont accélérées à partir de la révolution industrielle. En 800 000 ans, la concentration des principaux gaz à effet de serre n'a jamais été aussi élevée qu'actuellement. S'agissant du CO₂, il faut remonter jusqu'à trois millions d'années en arrière pour trouver des niveaux de concentration similaires. Ce surcroît d'émissions a déséquilibré le bilan d'énergie de la Terre qui a donc accumulé une grande quantité de chaleur supplémentaire. Celle-ci a été absorbée à 93% par les océans qui mettront plusieurs siècles pour dégager cet excès d'énergie responsable de perturbations du système climatique et d'événements météorologiques extrêmes. Une telle inertie confère au changement climatique un caractère

La formidable aventure scientifique des sciences du climat a permis des progrès considérables dans l'observation et la compréhension du réchauffement climatique.

irréversible. C'est pourquoi il faut donc limiter autant que possible chaque fraction de réchauffement supplémentaire.

Le rapport du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C en moyenne démontre que les impacts seront inégalement répartis sur le globe, les écosystèmes et les populations. Il fera plus chaud sur les continents et autour des pôles, plus sec dans les régions chaudes. Les périodes de canicules, plus fréquentes et plus longues, seront plus intenses dans les villes. En cas de réchauffement à +2°C, 100% des coraux seraient sévèrement dégradés et en arctique, la mer de glace serait totalement dégelée à la fin de l'été une année sur dix. Les populations fragiles seront encore plus exposées aux risques climatiques et au basculement dans la pauvreté. Certes, des mesures d'adaptation au changement

“ Entre 2018 et 2019, la quantité de chaleur due à l'effet de serre supplémentaire qui a été absorbée par l'océan représente 45 fois la totalité de l'énergie consommée sur terre par l'humanité.”

climatique existent, mais elles sont entourées d'incertitudes quant à leur efficacité et leur coût.

Contenir le réchauffement à 1,5°C nécessite des efforts sans précédent pour réduire de 50% les émissions mondiales de CO₂ entre 2010 et 2030 jusqu'à atteindre une émission nette de CO₂ qui soit nulle en 2050. Ne pas le faire exigerait des générations à venir de fournir des efforts colossaux pour obtenir des émissions nettes négatives de CO₂.

Le rapport sur les sols a mis en évidence le rôle essentiel joué par les terres dans la lutte contre le réchauffement climatique. D'un côté, elles capturent 29% du CO₂ d'origine anthropique et peuvent servir à produire de l'énergie biomasse en remplacement des énergies fossiles. Dans le même temps, elles subissent une pression humaine croissante exacerbée par le réchauffement climatique, en particulier dans les deltas, les zones littorales et les terres gelées. Les risques de pénurie d'eau, de feux de forêts, de baisse de rendement agricole s'avèrent particulièrement élevés. Dans cette perspective, des choix sociaux-économiques importants doivent être pris pour limiter les risques d'insécurité alimentaire.

Le rapport sur les océans et la cryosphère alerte sur une fonte des glaces inéluctable et qui s'accélère dans les glaciers continentaux et les calottes polaires, au point d'être devenue le facteur dominant de l'élévation du niveau de la mer, laquelle se poursuivra pendant des siècles. Les conséquences seront lourdes pour les hommes et les écosystèmes. Dans les hautes montagnes, les risques naturels comme les éboulements impacteront directement 670 millions de personnes. Plus en aval, ce sont des milliards d'individus qui à terme risqueraient d'être privés d'eau. Les écosystèmes marins seront d'autant plus affectés que l'océan deviendra plus chaud, plus acide et moins pourvu en oxygène.



Henri WAISMAN

Économiste, Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri)

Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision

VOIR L'INTERVENTION ▶

La plupart des scénarios qui permettent de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C à l'échelle globale à la fin du siècle impliquent de diminuer drastiquement les émissions de CO₂ dans la prochaine décennie et d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Une telle évolution requiert une transformation radicale et rapide de tous les secteurs d'activités, avec des conséquences économiques et sociales potentiellement importantes sur les populations, en premier lieu sur les plus vulnérables. Concernant cette population fragile, il faut chercher les solutions les plus adaptées, qui incluent des mesures d'accompagnement pour gérer les risques de tensions dans la transition. Si les émissions de carbone ne sont pas drastiquement réduites dans les prochaines années mais seulement stabilisées jusqu'en 2030, atteindre

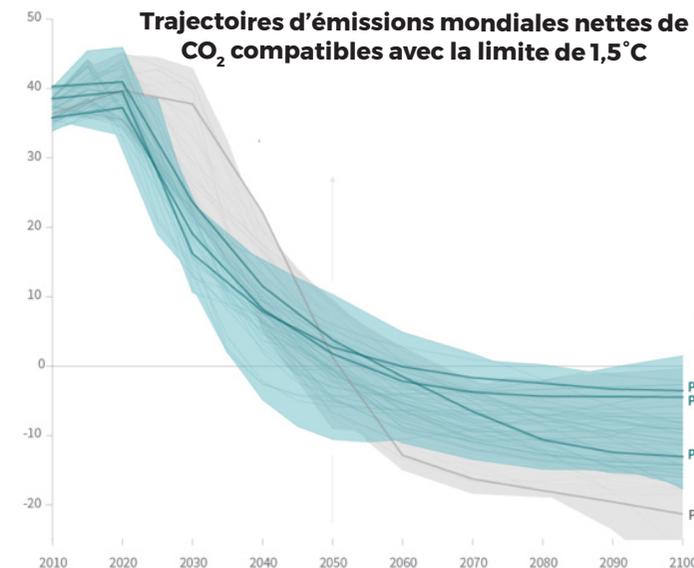
l'objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C impliquera de réduire très brutalement et profondément les émissions de gaz à effet de serre par la suite. C'est le scénario qui ressemble le plus à la poursuite des tendances actuelles. Il impliquerait de considérer une quantité importante d'émissions négatives dans la deuxième moitié du siècle via notamment une utilisation massive des technologies futures d'absorption du carbone (BECCS). Celles-ci consistent à produire en très grande quantité de la biomasse destinée à être consommée dans les usines de production électrique. Elles présentent toutefois l'inconvénient majeur d'entrer en concurrence directe avec les usages alimentaires des terres agricoles, ce qui pourrait être source de tensions.

Dans tous les cas, seule une production électrique totalement

décarbonée à l'horizon 2050 serait pertinente pour fournir l'énergie nécessaire à la décarbonation des autres pans de l'économie. L'industrie devra continuer à améliorer l'efficacité énergétique de ses technologies et de ses processus de production, mais il faudra aussi repenser les techniques de production et les modèles de consommation des biens industriels. Des efforts importants devront être concentrés sur la diffusion de bâtiments neufs très bien isolés, voire passifs, sur la rénovation du parc existant et sur la diffusion d'équipements efficaces. Si la question des transports est plus complexe, combinant notamment diffusion de nouveaux véhicules et déploiement d'infrastructures adaptées pour promouvoir les modes doux, une partie de la réponse se trouve évidemment dans la baisse de la demande de transport. Les pratiques agricoles et forestières devront

aussi évoluer vers un meilleur usage des sols pour réduire les émissions de CH₄ et de N₂O et stocker davantage de carbone.

En matière de politique publique de lutte contre le changement climatique, il peut y avoir des synergies avec les enjeux de développement durable. Dans certaines métropoles d'Asie, des problèmes graves de santé publique sont liées à la combustion du charbon et des émissions de polluants automobiles. Dans cet exemple, atténuer le réchauffement en supprimant le charbon et en réduisant les transports améliore aussi la santé publique. A l'inverse, il peut aussi y avoir des conflits d'arbitrage entre les enjeux climatiques et les enjeux sociaux : une augmentation du prix de l'énergie pour réduire la consommation risquerait d'avoir des impacts sociaux et économiques majeurs sur les populations en l'absence de mesures d'accompagnement adaptées. Il convient donc d'imaginer des paquets de politiques et mesures qui permettent d'aligner au



La trajectoire actuelle correspond à celle du scénario P4 avec une baisse rapide des émissions mondiales à partir de 2030 couplée à un recours massif aux solutions de captation du carbone.

mieux réductions de gaz à effet de serre et objectifs environnementaux. Contenir le réchauffement climatique à 1,5°C suppose d'agir vite et d'avoir une vision d'ensemble sur la transformation de la société.

Les actions de l'ensemble des acteurs, États, mais aussi collectivités locales, entreprises, associations et citoyens, doivent être pensées ensemble pour permettre de conjuguer leurs efforts dans cette direction commune.



Céline GUIVARCH
Directrice de recherches
Ecole des Ponts ParisTech

Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision (suite)

VOIR L'INTERVENTION ▶

En France, les émissions territoriales de gaz à effet de serre ont diminué de 19% depuis 1990. La stratégie nationale bas carbone a fixé à l'horizon 2050 un objectif de neutralité pour tous les gaz à effet de serre. Autrement dit, toutes les émissions de gaz à effet de serre qui seraient émises sur le territoire national à partir de 2050 seraient intégralement compensées par des puits de carbone équivalents. Cette ambition est plus grande que la moyenne mondiale et elle est cohérente avec la responsabilité historique de la France du changement climatique et sa capacité à agir.

Pour atteindre cet objectif de long terme, des étapes intermédiaires ont été définies, mais le rythme actuel de baisse des émissions n'est pas suffisant pour franchir à temps ces paliers. Ce rythme doit en

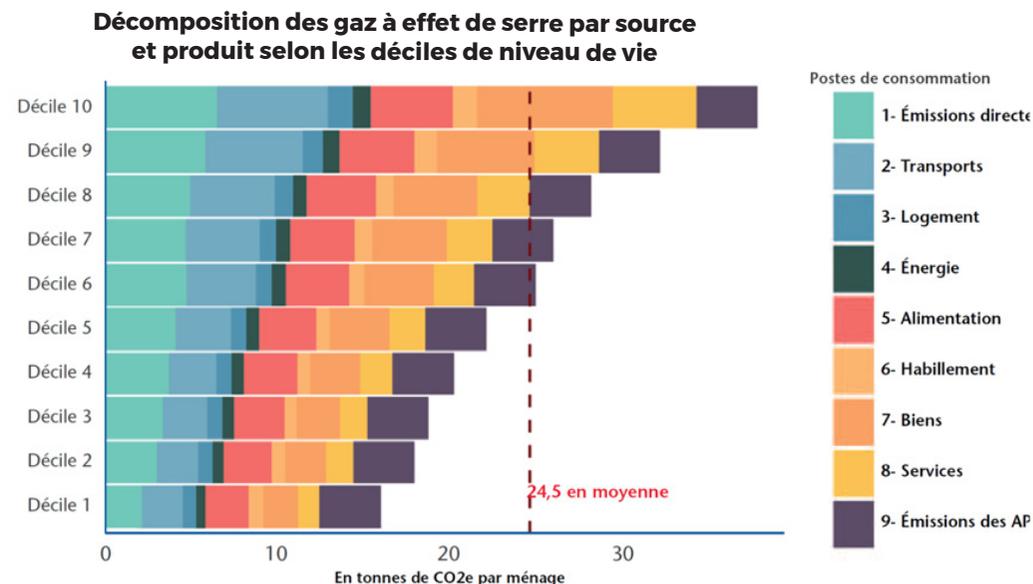
effet tripler d'ici 2025 pour respecter la stratégie nationale bas carbone.

Les émissions des secteurs des transports et du bâtiment représentent près de la moitié des émissions nationales. Or, les émissions des transports ont augmenté et celles du bâtiment ont insuffisamment diminué. Les leviers sont pourtant nombreux : vélo, marche, véhicules plus performants, moins lourds et mieux remplis, rénovation des bâtiments de meilleure qualité, etc. Actionner ces leviers relève des choix individuels, mais surtout des choix collectifs qui peuvent prendre la forme de normes ou d'infrastructures performantes. Par ailleurs, les puits de carbone ont diminué d'efficacité ces dernières années. En effet, face aux dangers des incendies, des parasites et des maladies qui sont accrus par le changement

Les 10% des ménages les plus aisés ont une empreinte carbone moyenne presque trois fois supérieure à celle des 10% les plus modestes.

climatique, les forêts sont davantage vulnérables et leur rôle dans la capture du CO₂ peut de ce fait être réduit. Planter des arbres ne peut suffire pour limiter le réchauffement climatique.

Un français émet en moyenne 6,6 tonnes de CO₂ équivalent par année, si toutefois le solde carbone des importations et des exportations est exclu du calcul. En intégrant ce solde,



Paul Malliet, 2020, « L'empreinte carbone des ménages français et les effets redistributifs d'une fiscalité carbone aux frontières », OFCE Policy brief 62

l'empreinte carbone moyenne d'un français s'élève à 11 tonnes de CO₂ équivalent/an/habitant depuis 2005. Cette empreinte carbone varie amplement en fonction du niveau de vie des habitants. Ainsi, les 10% des ménages les plus aisés ont une

empreinte carbone moyenne presque trois fois supérieure à celle des 10% des ménages les plus modestes. C'est pourquoi une augmentation du prix de l'énergie dans les transports est injuste car elle frappe plus durement les classes moyennes

qui ont dû se loger dans des zones éloignées des centres d'emploi et des transports en commun. L'action climatique pour être juste ne doit pas négliger son propre impact sur les inégalités.





Hervé LE TREUT

Climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace,
Académie des sciences

Anticiper l'évolution des territoires

VOIR L'INTERVENTION ▶

Le changement climatique est en cours. Il va se poursuivre, ses effets sont visibles et son évolution pour les 20 prochaines années est déjà dictée par les émissions passées. Dans cette perspective, les projections sociales deviennent plus difficiles à réaliser. La gestion des territoires apparaît de plus en plus complexe car les enjeux climatiques s'y concentrent et contraignent les sociétés à faire face à des risques nouveaux ou de plus grande ampleur. Les territoires doivent à la fois prendre des mesures d'adaptation pour protéger les populations des conséquences du changement climatique et engager des actions pour que ces mêmes populations limitent leurs gaz à effet de serre. Or, ces populations n'ont pas la main face à une grande part des problèmes qui leur sont imposés. Dans le même temps, les territoires auront à répondre à des enjeux économiques, sociaux, environnementaux qui peuvent se présenter comme autant d'impératifs contradictoires. De ce contexte de plus en plus marqué par les aléas, naît un besoin fort de dessiner des perspectives appuyées par la science. En effet, grâce à des approches multidisciplinaires et en s'appuyant sur des modèles fiables, la connaissance scientifique peut aujourd'hui apporter des repères manquants aux décideurs publics et les aider à mieux cerner les problèmes à venir.

“Pour gérer un territoire, il faut prendre en compte la réalité du futur et celle-ci se présente sous forme de risque. (...) Il y a un besoin fort de dessiner des perspectives appuyées par la science.”

Acclimaterra est un collectif de 200 scientifiques pluridisciplinaire qui a synthétisé l'ensemble des études sur les impacts du changement climatique pour la Région Aquitaine. De nombreux diagnostics en ont découlé et ont permis de formuler des recommandations pour l'action publique. Par exemple, les observations et les analyses scientifiques ont déterminé que les passes sablonneuses et les perspectives d'érosion du littoral étaient très importantes dans le bassin d'Arcachon et qu'elles limitaient de fait la circulation aux seuls petits bateaux. Idem pour les ressources en eau douce de la Région : l'évaluation des quantités d'eau douce disponible a permis d'organiser les activités agricoles en fonction de cette

Les territoires sont aussi un espace de décision et de réflexion sociale. Compte tenu des changements majeurs à adopter collectivement, une adhésion sociale extraordinaire est nécessaire et cela suppose au préalable une information largement partagée par la population. Il faut donc trouver des solutions pour impliquer la société dans son ensemble sur ces enjeux.

donnée, avec un large consensus. Pour la suite de ces projets, les chercheurs devront développer une science du suivi actif de l'environnement régional. En revanche, le collectif s'est trouvé démuné pour répondre aux enjeux de transport et de logement liés à l'urbanisme de la métropole bordelaise. Certains sujets ont effectivement besoin d'une science qui reste encore à inventer.





Le débat de la session 1

serait a priori un effet de refroidissement mais des incertitudes demeurent sur cette question.

Quelle surface totale la technologie du BECCS devrait-elle couvrir ? Dans quelle mesure rentre-t-elle en compétition avec les cultures alimentaires ?

Henri Waisman : L'objectif de l'analyse à long terme est de déterminer les actions à mener à court terme. L'enjeu fondamental est celui de l'ampleur de la diffusion de la technologie, puisque celle-ci va déterminer l'ampleur des problèmes qui lui sont associés (compétition

sur les usages des sols, impacts sur la biodiversité, etc.) Si à court terme, les tendances actuelles se poursuivent et si les objectifs de limitation du réchauffement sont maintenus, alors il faudra nécessairement développer à grande échelle cette technologie. A contrario, plus les transformations s'opèrent vite et de manière ambitieuse, moins il y aura de risques d'arbitrages auquel personne n'a envie d'être confronté. En l'absence de solution miracle, il faut repenser le modèle de consommation pour limiter les effets négatifs

collatéraux du changement climatique.

Les technologies de captation du carbone sont consommatrices d'énergie. Au final, le bilan CO₂ est-il favorable ?

Céline Guivarch : Les analyses de cycle de vie appliquées à ces technologies montrent les différents impacts environnementaux de ces solutions qui effectivement, enfouissent plus de carbone qu'elles n'en émettent. Toutefois, la séquestration de carbone n'a pas encore été appliquée à grande échelle. Il conviendrait

d'accélérer le développement de cette technologie.

Faut-il limiter la démographie pour réduire les émissions de CO₂ ?

Henri Waisman : Il est nécessaire de construire pour les pays à forte natalité des trajectoires de développement qui soient compatibles avec les ambitions climatiques et qui permettront aux taux de natalité d'évoluer à la baisse. Pour cela, d'importantes innovations technologiques et sociétales sont requises.

Comment peut-on prévoir le climat ?

Etienne Ghys : La météo est chaotique et il est impossible de prévoir le temps qu'il fera à une date précise, par exemple dans un mois. Le climat se comprend quant à lui sur des durées beaucoup plus longues, de l'ordre de 30 ans et les prévisions sont de nature différente. S'il s'agit de faire des prévisions de moyennes de température sur de longues périodes, cela devient possible et ne contredit pas le chaos.

Pouvoir naviguer en Arctique représente-t-il un risque ou une opportunité ?

Valérie Masson-Delmotte : Les choses sont nuancées. La voie ouverte par le recul de la mer de glace offre à la fois des opportunités (raccourcissement des distances du transport de marchandises entre l'Asie et l'Europe, créations d'infrastructures

portuaires etc.) et des risques (introductions d'espèces invasives, pollution locale, pressions sur les populations autochtones et leurs modes de vie...).

Dans quelle mesure le changement climatique peut-il modifier le rôle des anticyclones ?

Hervé Le Treut : Les connaissances actuelles permettent plus facilement de décrire les phénomènes d'été ou situés dans la zone intertropicale. Les liens entre le changement climatique et les tempêtes de moyenne latitude sont encore sujets à débat.

Les particules ont apparemment un effet refroidissant sur l'atmosphère. Faut-il les augmenter ?

Valérie Masson-Delmotte : Certaines particules ont un effet réchauffant, d'autres ont un effet refroidissant. L'effet net



L'évolution attendue du climat est anxiogène. Cela risque-t-il de démobiliser les jeunes ?

Valérie Masson-Delmotte : Dans la plupart des pays du monde aujourd'hui, l'éducation au changement climatique est manquante alors que la connaissance scientifique existe. Laisser les jeunes s'informer seuls et les laisser exposés à la désinformation est ce qu'il y a de plus anxiogène. Il faut une éducation pour comprendre, pour développer l'empathie indispensable à l'acceptation des transformations à venir.

Session II - Changement climatique, risques et enjeux

Le climat de notre planète a évolué tout au long de son histoire géologique. Au cours des deux derniers millénaires les variations des températures moyennes saisonnières sont restées modestes mais ont déjà été responsables de disettes décrites dans les archives historiques. Depuis le début de l'ère industrielle, une nette tendance au réchauffement est observée grâce au réseau météorologique mondial.

Suivre le comportement du climat de la Terre nécessite de faire appel aux moyens d'observation et aux systèmes informatiques les plus modernes. Les observations satellitaires apportent une couverture globale des paramètres météorologiques et du niveau des mers dont on observe la montée continue. Grâce à cet ensemble gigantesque de données, le développement de modèles simulant la circulation à l'échelle globale de l'atmosphère et de l'océan permet de prédire la situation météorologique à l'échelle de la semaine. Les modèles simulent aussi le climat moyen de l'atmosphère pour les prochaines décennies en tenant compte de l'accroissement d'effet de serre dû aux émissions humaines de CO₂. Le changement climatique que nous vivons s'accompagne d'événements extrêmes qui tendent à devenir de plus en plus fréquents. Leurs conséquences tant pour les sociétés humaines qui subissent des cyclones ou des épisodes de sécheresse que pour la biodiversité sont considérables. En outre, le réchauffement entraîne une désynchronisation des cycles entre les espèces et une perturbation des chaînes alimentaires. Les aires de répartition des espèces sont réduites ou modifiées.

La science aujourd'hui est capable de retracer l'histoire du climat, de démontrer le rôle de l'homme dans son réchauffement et d'évaluer pour chaque grande région les conséquences probables à venir en fonction de l'ampleur du réchauffement. Ces estimations des différents risques sont essentielles pour aider les nations à définir leurs orientations en matière de politique climatique.

présidé par
Jean-Claude DUPLESSY,
Académie des sciences





Anny CAZENAVE

Géophysicienne, Observatoire Midi-Pyrénées,
International Space Science Institute (Bern),
Académie des sciences

VOIR L'INTERVENTION ▶

Changement climatique, risque et enjeux : le rôle des observations

Les études sur le changement climatique reposent sur une bonne observation des variables du climat. Celle-ci doit être précise, globale et pérenne, de manière à obtenir des séries de données longues et qui couvrent l'ensemble du globe. Cela permet de travailler sur des échelles de temps et d'espace différents, qui peuvent être très vastes ou au contraire très réduites. Le recueil de ces informations s'effectue principalement par l'analyse de mesures faites par différents capteurs embarqués sur satellite et à l'aide de mesures réalisées *in situ*.

Observer les variations des paramètres qui caractérisent le climat est essentiel pour mieux comprendre les processus du changement climatique et pour détecter des éventuels changements brusques. Cela sert également à alimenter les modèles développés pour simuler le climat du futur et/ou les valider.

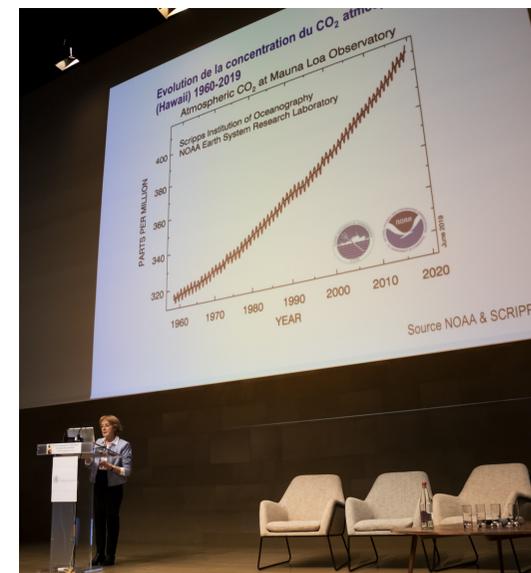
Le Global Climate Observing System (GCOS, Organisation Météorologique Mondiale) définit 7 indicateurs climatiques globaux : la température de l'air en surface, la teneur en CO₂ atmosphérique, le contenu thermique de l'océan, l'acidification de l'océan, le niveau de la mer, les glaciers continentaux et les banquises arctique et antarctique. Ces indicateurs sont utilisés par exemple pour retracer l'évolution de la température moyenne de la Terre depuis 1850, l'augmentation du réchauffement de l'océan, ou encore l'évolution de la concentration du CO₂ atmosphérique.

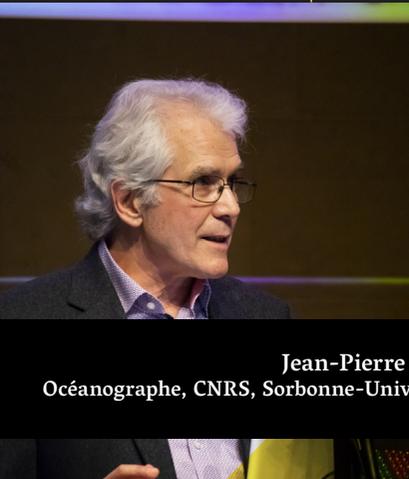
Le GCOS identifie également 54 variables climatiques essentielles à observer sur le long terme pour suivre l'évolution du climat. Leur analyse informe sur les grands cycles globaux, tels que le cycle du carbone, de l'eau et de l'énergie. 27 de ces variables climatiques

essentiels sont observables depuis l'espace, ce qui permet un suivi à l'échelle de la planète entière, pour des applications de surveillance de l'environnement et de son évolution. Par exemple, l'analyse de données satellites et *in situ*, combinée à des simulations numériques océaniques permet –comme en météorologie– de prévoir l'état de l'océan plusieurs jours ou semaines à l'avance (c'est l'océanographie opérationnelle). En Europe, le programme Copernicus encadre les projets de surveillance de l'environnement, notamment, celle des terres émergées, de l'océan et de l'atmosphère.

L'Observatoire Spatial du Climat (SCO) a été créé à l'initiative du CNES en France, avec l'objectif de développer et de mesurer de nouveaux indicateurs d'impacts du changement climatique, ceci afin d'aider les décideurs à mieux gérer leurs territoires. C'est aujourd'hui un consortium international constitué de « SCO » nationaux ou régionaux ayant des objectifs spécifiques à leurs territoires en termes d'atténuation ou d'adaptation aux impacts du changement climatique. Il est important de développer des outils appliqués à la surveillance et la gestion des risques climatiques qui ne soient pas conçus que pour des scientifiques, mais aussi pour des utilisateurs finaux, comme les décideurs publics locaux.

Il faut réussir à combiner les observations de l'environnement à des données socio-économiques pour développer de nouveaux indicateurs qui permettront aux décideurs de mieux évaluer les risques et de mieux adapter leurs territoires.





Jean-Pierre GATTUSO
Océanographe, CNRS, Sorbonne-Université, Iddri

L'océan de l'Anthropocène

VOIR L'INTERVENTION ▶

L'océan joue un rôle essentiel dans la limitation des changements climatiques, mais en absorbant près d'un quart des émissions anthropiques de carbone et plus de 90% de la chaleur produite par l'effet de serre excédentaire, il en subit aussi les conséquences. La teneur en CO₂ a augmenté de 30% depuis la révolution industrielle et cela a conduit à une acidification de l'océan qui a des conséquences négatives, en particulier sur les coraux et les mollusques. Emmagasiner autant de chaleur dans l'océan entraîne mécaniquement son réchauffement ainsi qu'une réduction de sa teneur en oxygène. Cela conduit notamment à un déplacement massif d'espèces. De plus, l'augmentation de la température de l'eau entraîne l'augmentation du volume de glaciers et calottes polaires. Les deux processus contribuent à

l'élévation du niveau de la mer et à l'érosion du littoral. Depuis le début du 20^{ème} siècle, le niveau de l'océan s'est élevé de 15 cm et le phénomène s'est accéléré. La montée des eaux est deux fois plus rapide aujourd'hui.

Le rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère compare deux scénarios : le RCP8.5 correspondant à une perspective dénuée de toute action pour atténuer le réchauffement climatique, et le RCP2.6 qui présente une trajectoire d'émissions de CO₂ cohérente avec les engagements des accords de Paris, soit une limitation du réchauffement à +2°C.

En prenant en compte les hypothèses les moins favorables, d'ici 2100, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère pourrait tripler par rapport à sa valeur pré-industrielle, les événements extrêmes historiquement rares,

qui arrivent normalement une fois par siècle, pourraient survenir tous les ans et l'élévation du niveau de l'océan pourrait atteindre 1,10 m, voire 5,40 m en 2300. L'accumulation de chaleur par l'océan pourrait être multipliée par sept. Les vagues de chaleur impactant les coraux et la flore marine pourraient être bien plus intenses et leur fréquence multipliée par 50. Les transformations opérées seront massives en termes de déclin de la biomasse et de déplacement des espèces.

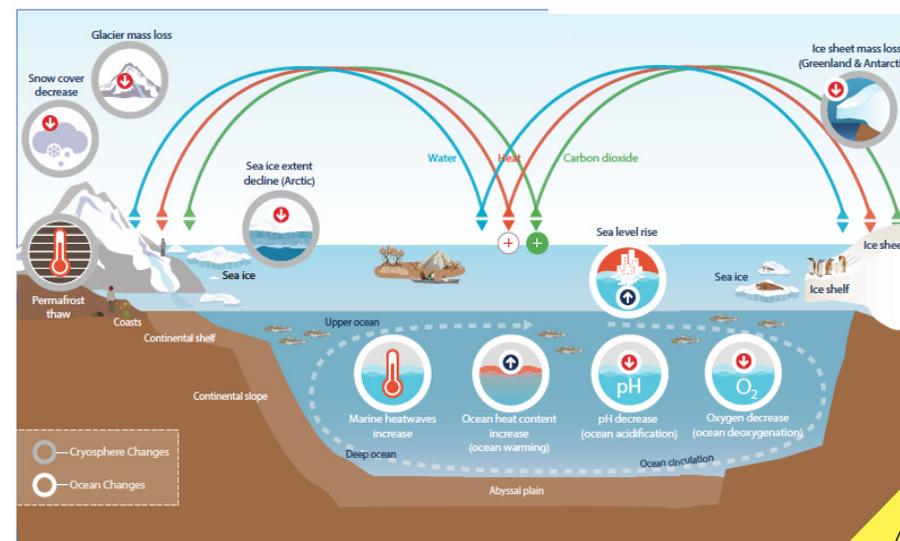
Dans la projection RCP2.6, les effets resteront importants mais plus limités. Ainsi, l'excès de chaleur serait seulement doublé, les vagues de chaleur maritime seraient tout de même 20 fois plus fréquentes qu'aujourd'hui. S'agissant de l'élévation du niveau de l'océan, même dans le meilleur des cas, le processus ne peut être inversé d'ici la fin du siècle, il ne peut

être que ralenti et modéré. En effet, l'inertie de l'océan est telle qu'il faudra plusieurs siècles pour que l'océan retrouve une température stable après avoir absorbé autant de chaleur.

Pour préserver la vie marine, le réchauffement doit être contenu à +1,5°C et l'acidité à -0,2 unités pH. Avec le scénario RCP8.5, 69% de la surface de l'océan sortirait de ces valeurs limites. Dans le RCP2.6, moins de 1% de l'océan serait concerné.

Afin d'éviter une diminution globale de la biomasse animale, accompagnée d'une chute du potentiel de pêche, il est urgent de mener une action ambitieuse, prioritaire, qui soit rapide et coordonnée, et qui s'inscrit dans la durée. Parmi l'éventail des actions possibles, il serait judicieux de privilégier les actions dites "décisives" comme l'utilisation des énergies renouvelables marines et le stockage de carbone dans le sous-sol océanique. Les

actions dites "sans regret", qui ont une efficacité limitée mais présentent de nombreux co-bénéfices et très peu d'effets collatéraux négatifs, sont aussi à encourager. Il s'agit par exemple de la réduction de la pollution, du développement des aires marines protégées, de la végétalisation du littoral...





Olivier BOUCHER
Climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace

Modèles et projections

VOIR L'INTERVENTION ▶

La modélisation est au cœur de la science climatique. Elle est indispensable pour retracer le climat passé avant l'ère industrielle et pour imaginer ce que pourrait être le climat du futur. L'atmosphère et l'océan ont un caractère chaotique, c'est pourquoi il n'est pas possible de réaliser des prévisions météorologiques à plus de dix jours. Le climat hérite de ce fonctionnement, mais il suit également une tendance de long terme liée aux émissions de gaz à effet de serre. Le modèle sert à faire le distinguo entre la variabilité naturelle de court terme des différentes variables du climat et leurs évolutions de long terme. Cela permet ainsi d'identifier le rôle des activités humaines dans la perturbation du climat.

Les modèles climatiques sont limités par la puissance des

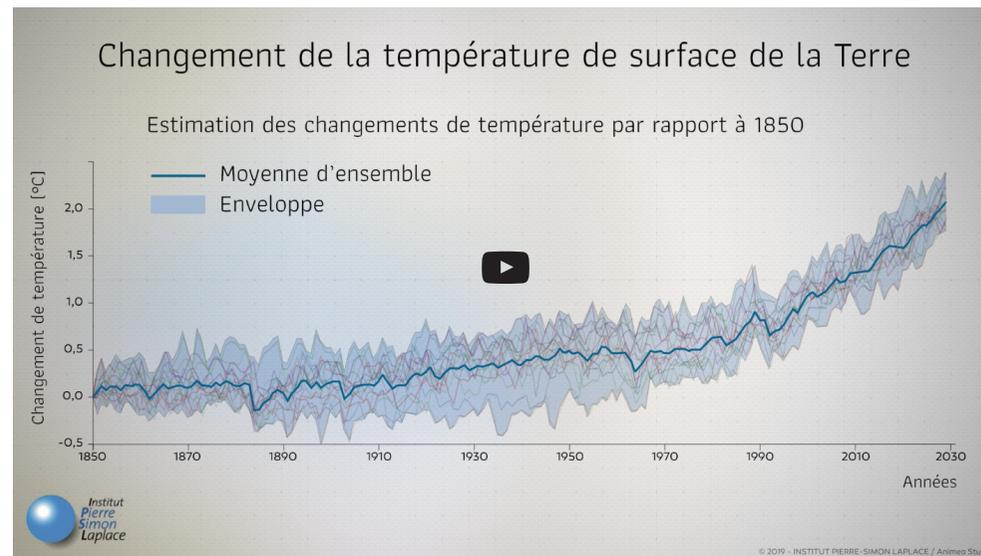
supercalculateurs et ne peuvent produire des analyses qu'à une échelle grossière, de l'ordre de 150 km. Ils sont complétés par des méthodes statistiques et dynamiques lorsqu'il faut mener des études à une échelle plus petite.

Construire un modèle climatique ne se limite pas à un simple assemblage des modèles d'océan, d'atmosphère et de surfaces continentales car il faut ajuster finement entre eux les paramètres qui déterminent les composants essentiels du climat. Pour réaliser ces ajustements, pour obtenir une simulation qui soit la plus fidèle possible à la réalité, il est nécessaire de comparer les résultats aux observations. Or, le climat n'est pas à l'équilibre, il se réchauffe, ce qui introduit un biais dans la comparaison. Pour corriger ce biais, un "pseudo climat" à l'équilibre, artificiellement construit, sert de point de comparaison.

En réalisant plusieurs simulations du climat, et en comparant ces simulations entre elles, la composante anthropique du changement climatique est mise en évidence ainsi que les marges d'incertitudes associées.

Au fil des années et des recherches, les modèles climatiques s'avèrent d'ailleurs de plus en plus fiables : les données issues de modèles correspondent de plus en plus près aux données observées. Le dernier modèle climatique de l'IPSL présente une sensibilité climatique plus forte que les précédents. En effet, il apparaît que le climat réagit plus fortement aux variations

de CO₂ que ce qui était calculé dans les modèles de l'ancienne génération. Ainsi, dans le scénario le plus pessimiste, les augmentations de température sont encore plus fortes qu'initialement prévu. Dans le scénario le plus favorable, l'élévation de température reste identique que dans le précédent modèle. Cette amélioration méthodologique se vérifie notamment sur les



vagues de chaleur sur trois jours ou sept jours consécutifs : les simulations corroborent les observations.

Le modèle permet également de déterminer le niveau d'émission maximal de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique à +2°C d'ici 2100, ce qui implique d'atteindre la neutralité carbone en 2070.



Venkatramani BALAJI
Géophysicien, Princeton University,
Institut Pierre-Simon Laplace

Évolution des technologies des données : opportunités et défis pour la simulation et l'analyse du système Terre

VOIR L'INTERVENTION 

Les modèles climatiques permettent autant de retracer l'histoire de la température terrestre que d'établir des scénarios pour le climat du futur. Grâce à ces outils, chacun sait par exemple que le climat depuis 500 millions d'années a été marqué par de fortes amplitudes, étalées sur des millions d'années, qu'il est plus stable et plus clément depuis environ 10 000 ans, ce qui a permis l'émergence des civilisations.

C'est en 1979, avec le rapport Charney que les premiers scénarios climatiques font leur apparition. Le rapport concluait déjà à l'époque qu'un doublement hypothétique du CO₂ dans l'atmosphère pouvait aboutir à un réchauffement compris entre +1,5°C et +4,5°C. Depuis, les modèles climatiques sont devenus encore plus robustes, plus précis et

peuvent avoir de multiples applications comme le calcul des effets d'attribution. En effet, l'évolution d'un phénomène climatique résulte de nombreux facteurs qui interagissent entre eux. Or, les outils de simulation peuvent désormais calculer les contributions respectives de chaque facteur. Il s'agira par exemple de comparer deux probabilités, l'une prenant en compte les effets de l'activité humaine, l'autre non. Il devient alors possible d'isoler le rôle probable de l'homme dans l'évolution des événements climatiques.

Les incertitudes sont toujours de trois ordres et se combinent les unes aux autres : la part chaotique qui est la traduction de la variabilité naturelle du climat et qui tend à se réduire sur le long terme, l'incertitude humaine qui s'accroît avec le temps car elle dépend des choix

de société, l'incertitude épistémologique qui est un marqueur de la robustesse des modèles et qui décroît également avec le temps.

Améliorer ces modèles demande toujours plus de données, d'analyses et de gestion des données, à tel point que les simulations



produisent aujourd'hui autant d'informations que les observations satellitaires. Le big

data a fait multiplier par cent le volume des données. La puissance de calcul pour traiter ces informations équivaldrait à 25 millions d'ordinateurs. Une telle masse d'informations ne peut être exportée pour être analysée. La solution est donc de faire intégrer les modèles d'analyse au cœur même de la base de données.

La loi de Moore stipulait que la quantité de calcul doublait tous les 18 mois. Elle s'est

vérifiée jusqu'à lors, mais cette loi atteint actuellement ses limites : l'arithmétique

numérique commence à saturer et n'accélère plus. Face à cette réalité, le deep learning, autrement appelée intelligence artificielle, offre une issue pour améliorer encore la précision des simulations. Le calcul se transforme en apprentissage, la simulation devient émulation dans le sens où elle évolue à partir d'une meilleure compréhension du système. Toutefois, si les prévisions s'avèrent plus justes, elles ne sont pas toujours interprétables. Or, la prévision sans la théorie pour l'interpréter n'offre aucune avancée scientifique. À cela s'ajoute la difficulté d'une actualisation permanente de l'apprentissage pour réussir à comprendre un climat en cours d'évolution. Par ailleurs, le coût en carbone de tous ces calculs de grande ampleur n'est pas neutre.



Sonia SENEVIRATNE
Climatologue, ETH Zurich

ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

VOIR L'INTERVENTION 

Selon un rapport sur les risques globaux paru au forum économique mondial de Davos, l'échec de l'action climatique et les événements climatiques extrêmes constituent les risques globaux les plus probables et parmi les plus graves dans l'avenir. Les deux risques sont d'ailleurs liés puisque de nombreux événements climatiques extrêmes sont accentués par le réchauffement climatique. Cela a été clairement mis en évidence dès les premiers rapports du GIEC. Une augmentation constante de la température locale peut par exemple provoquer à terme sécheresses et feux de forêts. Pour éviter que ces phénomènes ne se reproduisent trop souvent et pour limiter leur ampleur, il est impératif d'atteindre rapidement la neutralité carbone.

En 2018 et 2019, les événements extrêmes se sont multipliés à travers le monde et ont marqué les esprits. Ainsi en France, jamais le thermomètre n'avait atteint 46°C avant Juin 2019. À Paris, la température atteignait la moyenne saisonnière d'une ville comme Bagdad en Juillet 2019. Avec le changement climatique, les cyclones tropicaux sont accompagnés de précipitations plus intenses qui peuvent induire de fortes inondations.

Une augmentation moyenne de +1,5°C ne signifie pas que cette élévation globale de la température sera uniforme et constante sur la planète, bien au contraire. Le réchauffement sera beaucoup plus élevé sur les continents que sur l'océan, en particulier pour les températures extrêmes. Certaines régions et saisons connaîtront des augmentations moyennes

allant jusqu'à +3°C dans le pourtour méditerranéen ou +4,5°C en Arctique.

“À +2°C de réchauffement global, la France pourrait connaître des épisodes de canicule similaires à celui de l'été 2018 chaque année.”

Plus la température de réchauffement sera élevée, plus les impacts deviendront sévères, comme l'illustre le risque de feux de forêts qui est modéré pour 1°C de réchauffement, mais qui devient élevé pour un réchauffement global de 1,5°C. Les conséquences sur les récifs coralliens ou sur la région Arctique seront également beaucoup plus importantes

lorsque ce seuil critique de +1,5°C sera atteint.

Il est crucial de maintenir le réchauffement à +1,5°C sous peine de voir augmenter les températures extrêmes dans la plupart des régions habitées

du monde. Les précipitations deviendraient plus intenses dans de multiples régions, tandis que certaines seraient confrontées à plus de risques de sécheresse. Un réchauffement global de +2°C conduirait à l'extinction de nombreuses espèces animales et végétales qui serait un dommage irréversible, auquel s'ajoutent ceux causés par la montée du niveau

Dans un climat stable sans modifications dues aux émissions humaines de gaz à effet de serre, les canicules en France seraient beaucoup moins fréquentes et moins intenses. L'influence humaine sur le climat a ainsi multiplié

par cent la probabilité que la canicule de juillet 2019 survienne. Elle a aussi aggravé la canicule de 1,5°C à 3°C. De même, la probabilité pour que Nîmes enregistre en juin 2019 ce record absolu de chaleur avec 46°C a été multipliée par cinq. Le réchauffement climatique a également majoré ce phénomène de 4°C supplémentaires.

Durant l'été 2018, 22% des surfaces terrestres habitées de l'hémisphère Nord étaient impactées en même temps par des températures extrêmes: cela a inclus des canicules sévères causant des impacts sanitaires et des dommages sur les infrastructures, ainsi que des risques accrus de feux de forêts. Or, selon les simulations historiques menées, il est virtuellement certain que les canicules simultanées dans l'ensemble de l'hémisphère Nord n'auraient pas pu avoir lieu sans l'influence humaine. Dans un monde à +1°C, ce phénomène risque de se produire une fois tous les six ans. Dans un monde à +1,5°C, la probabilité s'élève à deux années sur trois. Cela aurait lieu chaque année dans un monde réchauffé de +2°C.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET BIOSPHÈRE



Isabelle CHUINE
Écologue, Centre d'écologie
fonctionnelle et évolutive (CEFE)

VOIR L'INTERVENTION 

La biosphère rend de nombreux services à l'homme comme la pollinisation, les ressources génétiques, la fertilité des sols ou la gestion des maladies vectorielles (maladies véhiculées par des organismes vivants). Toutefois, ces services sont remis en cause par la dégradation rapide de la biodiversité, en nombre et en abondance d'espèces, ainsi qu'en diversité génétique. Le taux actuel d'extinction des espèces est ainsi dix fois supérieur à ce qu'il était les dix millions d'années précédentes.

Le changement climatique est la troisième cause de cette perte de biodiversité, après la destruction des habitats naturels et le prélèvements des ressources à des fins alimentaires ou industrielles. Le changement climatique exacerbe les autres pressions de l'homme sur la biodiversité

et est devenu le facteur majeur des changements observés. A terme, il pourrait devenir la première cause d'extinction des espèces.

Il altère les rythmes biologiques : les périodes de reprise d'activité au printemps sont avancées, laissant les végétaux plus exposés aux gels tardifs. La période de fin des activités à l'automne est retardée, ce qui accroît le stress hydrique. La désynchronisation des cycles entre les espèces vient perturber et parfois rompre les chaînes alimentaires.

Le changement climatique réduit et modifie les aires de répartition des espèces, qui tendent à migrer plus en altitude ou à se rapprocher de migration des espèces est bien souvent inférieure à la vitesse de changement climatique. Ces

espèces sont donc menacées d'extinction, à commencer par celles vivant déjà près des cimes ou près des pôles et qui ne peuvent migrer plus loin. Une assistance de l'homme dans

“La vitesse du changement climatique dépasse celle de nombreuses espèces : la migration assistée devient nécessaire”

la migration de ces espèces doit être envisagée pour leur préservation. Par ailleurs, le changement climatique, en modifiant la répartition géographique des espèces, conduit à faire proliférer certaines espèces nuisibles comme le moustique de la malaria et bouleverse l'équilibre de certains écosystèmes.

Le changement climatique augmente l'activité de photosynthèse, ce qui permet de stocker du carbone et d'obtenir un bilan carbone net positif. En revanche, dans les régions trop chaudes, ou exposées à des sécheresses intenses qui rendent difficile la photosynthèse, le bilan

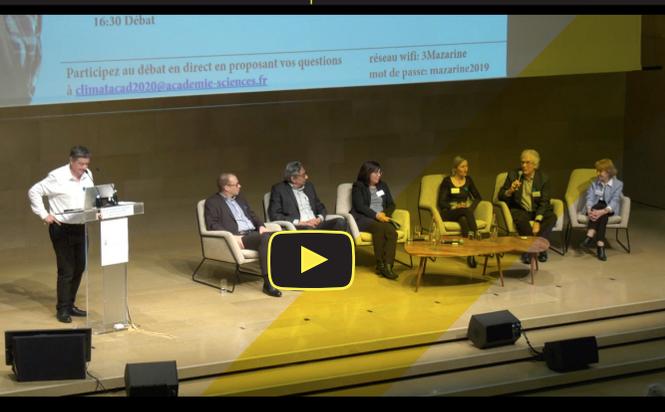
carbone peut devenir négatif. En juin 2019, le feuillage des chênes verts, espèce méditerranéenne pourtant adaptée aux climats secs et chauds a été endommagé en quelques heures de manière irréversible. Ce phénomène qui fut massif risque de se reproduire avec d'autres canicules de même intensité.

La perte de diversité génétique dans les espèces cultivées risque de freiner la sélection de nouvelles variétés mieux adaptées aux conditions futures, et d'altérer la capacité des agroécosystèmes à résister aux aléas climatiques, aux épidémies et aux ravageurs.

Un moyen d'adaptation des êtres vivants est leur plasticité phénotypique adaptative, c'est-à-dire leur capacité à maintenir un bon niveau de performance dans des conditions changeantes. Mais cette plasticité a ses limites. L'évolution génétique des espèces, sous l'effet de la sélection naturelle induite par le changement

climatique constitue le moyen d'adaptation le plus efficace à long terme. La vitesse d'adaptation varie beaucoup entre espèces. Elle est rapide si le temps de génération est court, si la diversité génétique est élevée, et si la population est de taille suffisante.

Compte tenu des pressions colossales subies par la biosphère, il est non seulement important de lutter contre le changement climatique, mais il est aussi primordial d'agir sur toutes les autres causes de détérioration de la biosphère.



Pour obtenir une perspective unique d'évolution temporelle continue des données, il est nécessaire d'utiliser à la fois des informations du passé, issues de modèles ou de systèmes d'observations anciens et d'autres obtenues à partir d'instruments actuels beaucoup plus performants. Quelles sont les difficultés méthodologiques pour mettre ensemble bout à bout ces données disparates et de manière cohérente ?

Anny Cazenave : En s'appuyant sur les périodes de recouvrement entre deux systèmes d'observation, il est possible d'estimer les biais issus du caractère disparate des sources d'informations et de les corriger. Effectuer des bilans qui combinent plusieurs systèmes d'observations qu'il faut ajuster de manière à supprimer les erreurs systématiques est une autre méthode pour obtenir des séries de

données continues qui soient fiables.

Quel est le lien entre l'effet de serre et l'eau ?

Sonia Seneviratne : La vapeur d'eau est un important effet de serre naturel. L'effet de serre d'origine anthropique réchauffe davantage l'océan qui émet plus de vapeur d'eau. Il s'agit donc d'une boucle rétroactive.

Comment mesure-t-on les évolutions de l'énergie solaire et avec quelle précision ?

Olivier Boucher : Les mesures satellitaires permettent une bonne connaissance de la constante solaire, c'est-à-dire de la quantité de rayonnement émise au sommet de l'atmosphère. Elle est d'environ 1350W/m². La reconstruction historique de cette constante est plus difficile compte tenu du peu de recul à disposition.

Le débat de la session 2

La circulation thermo-aligne de l'océan Atlantique-Nord peut-elle être ralentie, voire s'arrêter ou s'inverser ?

Jean-Pierre Gattuso : Cette circulation se réduit effectivement. Toutefois, elle ne peut s'arrêter et encore moins s'inverser.

L'apprentissage des modèles par l'information artificielle s'appuie-t-il sur des connaissances physiques ou en fait-il abstraction ?

Venkatramani Balaji : Dans un apprentissage de base, seules les données d'entrée et de sortie sont connues, ce qui se

passé entre les deux étapes n'est pas su. Il est possible d'injecter dans le modèle d'intelligence artificielle des lois physiques pour l'enrichir. En revanche, si des connaissances physiques y sont ajoutées alors qu'elle présentent une part d'incertitude, le modèle ignorera cette incertitude car il intégrera l'information comme une vérité sur laquelle s'appuyer. Cela produit alors un biais de calcul.

Pourquoi enfouir du CO₂ dans le sous-sol océanique lorsqu'il serait plus aisé de le faire dans le sous-sol terrestre ?

Jean-Pierre Gattuso : La technique existe en Mer du Nord : des plateformes offshore qui exploitaient du pétrole ou du gaz sont utilisées pour enfouir du CO₂. Il faut cependant être vigilant au risque sismique pour éviter toute fuite et relargage du CO₂ dans l'océan et l'atmosphère.

Les observations statistiques sont-elles cohérentes avec les résultats des modèles en termes d'événements extrêmes ?

Sonia Seneviratne : Cela se vérifie effectivement sur les

précipitations extrêmes et sur les sécheresses.

Venkatramani Balaji : Il faut souligner qu'il y a une part de théorie dans les observations et qu'il ne faut donc pas opposer observations et simulations : les deux se nourrissent l'une l'autre.

Comment la diminution de la teneur en pH de l'océan est-elle mesurée ?

Jean-Pierre Gattuso : Il s'agit d'une échelle logarithmique : depuis 1850, le teneur en pH a diminué de 0,1 unité, ce qui correspond à une augmentation de 30% d'acidité de l'eau.

Comment la température à la limite de la troposphère et de la stratosphère évolue-t-elle ?

Olivier Boucher : Elle augmente dans la troposphère, mais de manière non uniforme tandis qu'elle diminue dans la stratosphère.

L'accès aux données est-il totalement libre ou y a-t-il des restrictions à leurs accès ?

Venkatramani Balaji : Les données sur le climat sont totalement en open source, mais leur traitement nécessite des quantités de ressources



Le débat de la session 2 - suite

informatiques qui de fait limitent leur accessibilité.

Anny Cazenave et Sonia Seneviratne : certaines données relatives à l'hydrologie restent confidentielles car considérées comme stratégiques pour certains pays.

Le blanchissement des coraux est-il lié à l'évolution du pH ou de la température de l'océan ?

Jean-Pierre Gattuso : Les coraux vivent en symbiose avec les microalgues qui colonisent leurs tissus et qui leur apportent de la nourriture. En cas de stress dûs aux pics de chaleur, les coraux expulsent ces microalgues et en meurent si la situation dure au delà de quelques jours.

Quelles sont les conséquences du réchauffement climatique sur le plancton dans l'océan ?

Jean-Pierre Gattuso : Le phytoplancton se nourrit de CO₂. L'augmentation de l'acidité de l'océan est donc de ce point de vue favorable au phytoplancton, mais ce dernier a également besoin de sels nutritifs des fonds des océans. Or, ces sels nutritifs peinent à remonter à la surface à cause du réchauffement climatique

qui perturbe les courants marins. En revanche, le CO₂ nuit au développement des zooplanctons et des phytoplanctons calcaires.

Pourrait-on traiter de manière globale les problèmes

écologiques au lieu de les maintenir cloisonnés ?

Isabelle Chuine : Certaines solutions qui développent la résilience de la nature mériteraient d'être davantage mises en œuvre.

Jean-Pierre Gattuso : Le GIEC et l'IPBES commencent à travailler ensemble sur des projets communs.

Anny Cazenave : Le programme « Future Earth » s'intéresse au global change qui inclut les problématiques du

changement climatique mais également tous les autres impacts majeurs de l'homme sur l'environnement.

Sonia Seneviratne : Une grande partie du GIEC s'intéresse aux impacts du changement cli-

matique, ce qui nécessite une approche globale.

L'objectif de 1,5 °C est-il encore réaliste ?

Sonia Seneviratne : En 2018, les données scientifiques établissaient clairement que cet objectif était physiquement atteignable si la société en faisait le choix. Il n'est pas encore trop tard pour agir et chaque effort pour lutter contre le changement climatique compte.

La science participative peut-elle aider à collecter des informations pour l'étude du climat ?

Anny Cazenave : La science participative est utilisée pour la météorologie ainsi que pour les sciences de l'environnement.

Isabelle Chuine : Cela permet notamment de mieux observer les dérèglements dans les cycles de développement des organismes.



Session III - Transitions: adaptation et réduction des émissions de gaz à effet de serre : trajectoires de développement résilientes et vers le zéro carbone

Face au réchauffement climatique, il faut à la fois s'adapter à l'inévitable et éliminer les émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, il faut changer la production et la consommation d'énergie qui dépendent à la fois des secteurs d'activité et des modes de vie.

Des transformations profondes sont urgentes dans tous les domaines et nos orateurs vont examiner le "champ des possibles" dans quelques cas importants : le transport, le bâtiment et l'urbanisme, quelques aspects économiques, l'utilisation des terres et le nécessaire stockage du CO₂, principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique. La session suivante examinera d'autres domaines comme l'électricité nucléaire et le stockage par batteries électriques.

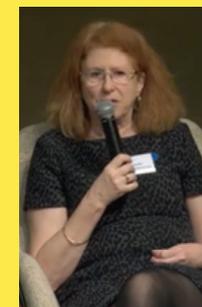
Au cours de cette session, nous verrons par exemple à quel point les véhicules lourds devraient être taxés en faveur de véhicules légers ou électriques, à condition que cette électricité soit décarbonée, et comment favoriser les transports en commun sans ignorer la possible apparition d'îlots de chaleur dans les centres-villes ni la difficulté de construire un réseau de transport dans un urbanisme dispersé.

Pour le chauffage des bâtiments, il faut accélérer l'isolation et abandonner les énergies fossiles au profit d'une électricité toujours décarbonée. En ce qui concerne l'utilisation des terres, il faut veiller à conserver une surface suffisante pour les cultures alimentaires malgré l'intérêt d'en utiliser une partie pour produire des bio-carburants.

Enfin, comme il semble impossible de supprimer toutes les émissions de CO₂, par exemple dans le transport aérien, il faut amplifier considérablement la capture et le stockage de ce CO₂ dans le sous-sol. Cela se fait déjà, en particulier en France, dans certaines couches aquifères profondes, mais il est nécessaire d'en développer significativement les capacités.



présidé par
Sébastien BALIBAR
Académie des sciences





ÉNERGIE ET CLIMAT : DES DÉFIS COMMUNS DANS LE PASSÉ COMME DANS L'AVENIR

Didier ROUX
Physico-chimiste, Unitec,
Fondation la Main à la Pâte,
Académie des sciences

VOIR L'INTERVENTION

Les énergies que nous utilisons proviennent essentiellement de l'énergie du soleil : la biomasse est produite à partir de la photosynthèse, les énergies fossiles proviennent de l'évolution de la biomasse, le vent a pour origine des différences de température entre deux masses d'air, l'hydraulique a besoin de l'évaporation naturelle de l'eau, on peut aussi directement transformer l'énergie solaire en chaleur ou en électricité. Dans ce panorama, l'énergie nucléaire est à part : ni renouvelable, ni fossile. Toutes ces sources d'énergies sont gratuites car ce que fait l'homme est de transformer une forme d'énergie en une autre utilisable par lui. Leur coût vient de leur mise en œuvre et du coût de la rente (accès au sol etc...)

La consommation mondiale d'énergie augmente de concert avec la population mondiale, mais à un rythme plus rapide.

Ainsi, la consommation d'énergie par tête au niveau mondial est en hausse continue depuis un siècle, mis à part lors de graves crises économiques où elle a stagné.

S'il existe une forte corrélation entre la consommation mondiale d'énergie et le PIB mondial, des écarts importants entre pays peuvent apparaître lorsque l'on le ramène au nombre d'habitants. Deux pays présentant un PIB/habitant voisin, peuvent avoir un niveau de consommation d'énergie/habitant jusqu'à dix fois supérieur. C'est le signe que certains pays gaspillent l'énergie plus que d'autres et donc que d'importantes marges de progrès sont possibles.

Une lecture historique de l'évolution de l'utilisation des énergies montre qu'un changement énergétique à l'échelle d'un pays a un temps

caractéristique de l'ordre de 30 à 60 ans. Par exemple, le nucléaire a mis 40 ans pour être installé dans le parc électrique français à son niveau actuel.

Il est important de rappeler la différence entre consommation d'énergie primaire et consommation d'énergie finale. La quantité de gaz nécessaire pour chauffer un bâtiment équipé d'une chaudière à gaz

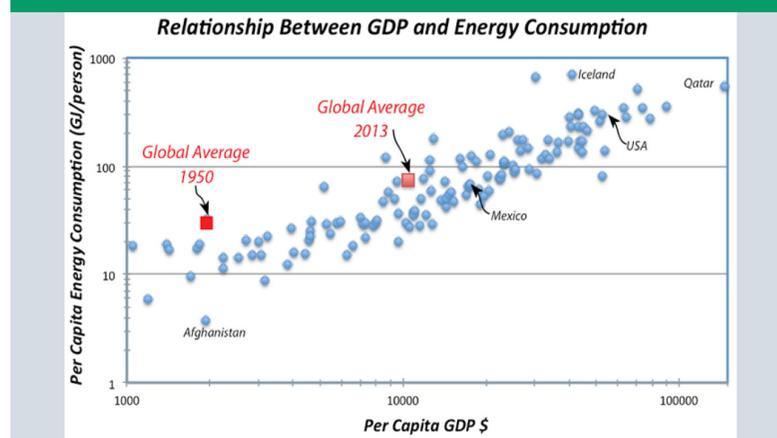
correspond à l'énergie finale. Le même bâtiment chauffé à l'électricité qui serait produite par une turbine à gaz utiliserait donc trois fois plus de gaz (le rendement d'une turbine à gaz est d'environ 30%), par conséquent l'énergie électrique finale utilisée comme chauffage correspond à environ trois fois plus d'énergie primaire. En France, le facteur de con-

version entre énergie primaire et énergie finale est fixée à 2,58.

En 2017, 80% de l'énergie utilisée était d'origine fossile. Cette donnée est à mettre en perspective avec le temps caractéristique de l'énergie qui est compris entre 30 et 60 ans. Certes, l'efficacité énergétique s'est améliorée, la production de CO₂/habitant et la production de CO₂/PIB a diminué en France,

mais les investissements dans les énergies renouvelables sont loin d'être installés au rythme initialement programmé dans le Plan Bas Carbone. Ce retard a été pris en compte dans la révision de la loi de transition énergétique de 2018 qui, de ce fait, est encore plus ambitieuse que celle de 2015. La question du réalisme de ces ambitions est posée : plus l'action tardera, plus les efforts à fournir devront être importants pour tenir les engagements.

CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE: DE FORTES DIFFÉRENCES





CONDITIONS ÉCONOMIQUES ET SOCIALES DU DÉCLENCHEMENT DE LA TRANSITION BAS CARBONE

Jean-Charles HOURCADE
Économiste, Ecole des hautes études en sciences sociales, Ecole des Ponts ParisTech

VOIR L'INTERVENTION ▶

Réussir à limiter le réchauffement à 2°C exige de prendre en compte les besoins de développement des pays pauvres, en particulier ceux détenteurs d'énergies fossiles. Vouloir les forcer à désinvestir ce secteur pour des raisons environnementales serait une impasse car ils feraient valoir leur droit à exploiter leurs ressources pour s'enrichir. Fixer un prix du carbone très élevé ne serait pas plus efficace car cela pèserait trop lourdement sur leurs économies. A titre illustratif, le maintien de la température globale à 1,5°C requièrerait un prix de la tonne de carbone compris entre 300€ et 400€. Or, un prix fixé à 50€ la tonne de carbone double déjà le prix du ciment en Inde. En 2019, quatre pays dont la France ont connu des mouvements de révolte importants suite à une hausse du prix de l'énergie.

“Le maintien de la température globale à 1,5°C requièrerait un prix de la tonne de carbone compris entre 300€ et 400€. Or, un prix fixé à 50€ la tonne de carbone double déjà le prix du ciment en Inde.”

Dans ce cadre, des alliances doivent être trouvées entre les pays occidentaux, la Chine et l'Inde, tout en intégrant autant que possible les pays en développement. Chaque pays devra alors trouver un accord politique pour que la mesure climatique ne freine pas la croissance économique et qu'elle soit socialement acceptée. Pour rappel, la croissance économique d'un pays est la somme de ses valeurs ajoutées, c'est-à-dire la somme des salaires et des marges des entreprises. Une décroissance correspondrait

donc à une réduction des marges et des salaires, ce qui est différent d'une sobriété de la consommation.

Financer la transition énergétique par une taxe carbone poserait des difficultés à cause de l'effet de propagation de cette taxe. En effet, cette taxe se répercuterait sur l'ensemble des secteurs de l'économie et contribuerait à une hausse non négligeable des prix. En France, une taxe carbone de 100€/t de carbone équivaldrait ainsi à 1,5% d'augmentation

du prix de panier moyen d'un ménage. La balance commerciale deviendrait très

déficitaire à cause de cette hausse des coûts. Certes, sécuriser le marché intérieur par rapport aux importations via des taxes aux frontières ou des normes techniques serait efficace, mais ne saurait être diplomatiquement acceptable vis-à-vis des pays du Sud à qui les pays du Nord ont promis une aide de 100 milliards d'euros pour financer la transition. Une barrière douanière serait perçue comme un renoncement à cette promesse d'aide. Le chèque vert qui est une mesure

sociale visant à compenser l'augmentation de l'énergie n'est pas non plus un outil adéquat car il ne compense pas l'augmentation des autres biens et services ayant renchéri suite à la hausse du prix de l'énergie.

La solution serait de compenser la taxe carbone par une baisse des impôts sur la production. La hausse des coûts serait alors réduite à quelques secteurs seulement. L'industrie française



et les ménages y gagneraient, à condition toutefois qu'un contrat social soit bien établi pour répartir entre patronat et salariés la baisse du coût de production. Des mesures pour encadrer les prix des loyers devraient aussi être engagées car le logement représente une très large part du budget des ménages.

Il s'agit aussi de promouvoir les investissements bas-carbone, mais les technologies non encore éprouvées et intensives en capital captent difficilement l'attention des investisseurs et des actionnaires qui préfèrent éviter de prendre des risques. C'est pourquoi il serait pertinent que les États souverains prennent en charge ce risque, cela permettrait de lever des financements privés beaucoup plus conséquents. L'urgence est de créer les conditions permettant d'accepter ce risque.



DÉCARBONER LE TRANSPORT: VÉHICULES ÉLECTRIQUES OU À HYDROGÈNE, TRANSPORT AÉRIEN, TRANSPORT MARITIME

Nicolas MEILHAN
Conseiller scientifique, France stratégie

VOIR L'INTERVENTION 

Le moyen de transport le plus utilisé par les français pour faire plus de 100 km est l'avion avec 110 milliards de km/an. Seulement 30% des français prennent l'avion et 2% font 50 milliards de km/an alors que le kérosène ne fait l'objet d'aucune taxation, y compris carbone. A titre comparatif, les émissions de GES des vols internationaux, qui ne sont pas comptabilisées dans nos inventaires nationaux, représentent la moitié de celles des voitures des gilets jaunes qui paient la taxe carbone.

Le transport est le seul secteur dont les émissions de GES augmentent depuis 1990 et les émissions de CO₂ des voitures neuves contribuent largement à cette évolution. En effet, la baisse depuis 20 ans des émissions de CO₂ des voitures neuves n'est qu'apparente et ne se constatait qu'en laboratoire. Un écart de 40% est

ainsi observé entre les cycles optimisés sur les bancs d'essai et les conditions réelles de cir-



ulation. La prise en compte des cycles réels de circulation ne sera pas effective avant 2030.

En 2008, suite à la mise en place d'un véritable bonus-malus, les ventes des véhicules

les plus lourds ont baissé au profit des voitures plus légères et plus économes, souvent de fabrication française. Depuis, les ventes de véhicules diesel ont fortement diminué et celles des sportive utility vehicles (SUV) a très nettement progressé, au point que l'impact carbone de ces dernières est devenu cinq fois plus important que toutes les émissions évitées des véhicules électriques qui pèsent encore trop peu dans le marché (2,5% des ventes). Cette situation s'explique notamment par un écart trop important entre le prix et les services rendus par cette technologie. En Norvège, les véhicules électriques représentent 60% des ventes car une fiscalité très forte est appliquée sur les véhicules thermiques pour réduire les écarts de prix à l'achat. A noter également que l'essentiel des batteries des voitures électriques vendues en France sont

construites en Pologne ou en Chine où le contenu en carbone de l'électricité est très élevé à cause de leurs centrales au charbon, ce qui limite le gain environnemental associé à la voiture électrique. En 2020, 30 000 Renault Zoé devraient être vendues en France et subventionnées à hauteur de 6 000€ chacune alors que les cellules de leurs batteries seront fabriquées en Pologne. En d'autres termes, la France va subventionner à hauteur de 200 millions d'euros l'industrie polonaise de production de batterie électriques produites avec du charbon comme énergie primaire.

“La voiture électrique n'est pas faite pour la ville car la voiture n'est pas faite pour la ville.”

Les dispositions actuelles du bonus-malus en France ne sont pas suffisamment efficaces pour infléchir le marché : 5% des acquéreurs bénéficient d'un bonus de 6 000€ lors de l'achat d'une voiture électrique et seulement 10% paient un malus de 500€ ou plus. Les malus s'appliquent donc surtout aux véhicules pesant plus de 1,7 tonnes, soit vingt-cinq fois le poids du conducteur transporté, seul dans 90% des cas quand il se rend à son travail. Cette situation est favorisée par les règles européennes qui encouragent les voitures lourdes et pénalisent ainsi l'industrie française.

Dans cette perspective, France Stratégie fait la proposition d'un bonus-malus indexé sur le poids des véhicules qui soit entièrement redistributif : les malus perçus serviraient à financer les bonus. Cela permettrait de compenser le bonus européen en place depuis 2009 sur le poids, de renforcer le malus français qui n'est plus assez dissuasif, d'exercer un meilleur contrôle car les fraudes à la pesée des voitures sont impossibles.

CAPTAGE ET STOCKAGE DU CO₂

Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL
Ingénieure géologue et docteure en géosciences, BRGM
- service géologique national, et CO₂GeoNet - réseau
d'excellence européen sur le stockage géologique de CO₂

VOIR L'INTERVENTION 

La neutralité carbone à l'horizon 2050 signifie que les émissions de gaz à effet de serre qui seraient incompressibles devront alors être intégralement compensées par des puits de carbone. Aux côtés des puits de carbone naturels (sols et forêts) qu'il faudra stimuler, il faudra développer le puits de carbone géologique qui est une solution industrielle consistant à capter les émissions de CO₂ des installations industrielles pour les stocker dans le sous-sol à l'abri de l'atmosphère. En France, cette option technologique permettrait d'éviter en 2050 jusqu'à 16 millions de tonnes de CO₂/an.

Cela revient à remettre dans le sous-sol, sous forme de CO₂, le carbone d'où il a été extrait sous forme de charbon, de pétrole ou de gaz naturel et dont l'exploitation est la principale cause du réchauffement climatique. La nature nous

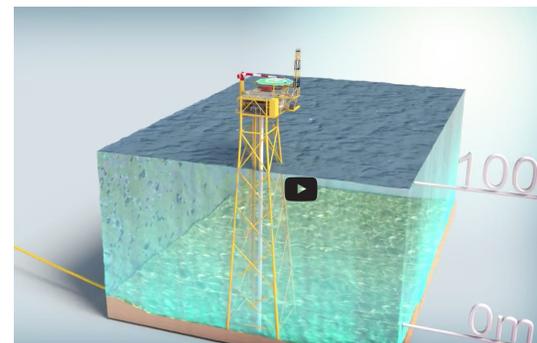
montre que c'est faisable car il existe sous terre de nombreux réservoirs de CO₂ vieux de plusieurs millions d'années, qui prouvent que les couches géologiques peuvent piéger durablement de très grandes quantités de CO₂.

Le CO₂ doit être injecté par un forage à plus d'un kilomètre de profondeur dans des couches géologiques profondes, poreuses et perméables, de type calcaire ou grès, où il est piégé dans la porosité de la roche, repoussant sur les côtés l'eau salée qui y est généralement présente. Une autre possibilité serait de stocker le CO₂ dans des gisements épuisés de gaz ou de pétrole. Dans les deux cas il est important de s'assurer de la présence juste au-dessus du stockage d'une couche argileuse imperméable, appelée roche couverture, qui joue le rôle de barrière et bloque toute remontée du CO₂.

Dans l'exemple d'un projet écossais en préparation, le CO₂ va être capté sur plusieurs industries, puis acheminé par pipeline jusqu'à une plateforme en mer du Nord où il va être injecté par forage à grande profondeur (2,4 km) sous plusieurs couches argileuses étanches. Concernant les mesures de sécurité, chaque site de stockage fait l'objet d'une approche sur-mesure, selon des lignes de conduite mondialement acceptées, pour tenir compte du milieu naturel géologique et de l'environnement du stockage. De nombreuses précautions sont ainsi prises : caractérisation du site, vigilance par rapport aux fuites et aux microséismes notamment lors de l'injection, contrôle de la pression, cohérence entre les mesures et les modélisations, surveillance des nappes phréatiques, des écosystèmes, etc.

A ce jour, 19 applications industrielles de cette technologie

sont en fonctionnement dans le monde, permettant à des centrales thermiques à gaz ou à charbon, mais aussi à des cimenteries, des aciéries ou des usines d'incinération de déchets de stocker 1 million de tonnes de CO₂/an dans le sous-sol profond. Toutefois, la



recherche doit se poursuivre pour réduire les coûts, améliorer les performances et généraliser le déploiement de ce puits de carbone jusqu'à obtenir plusieurs milliers d'opérations dans le monde d'ici 2050. Mais une telle diffusion de la technologie n'est envisageable que si un modèle économique viable pousse à investir, via un marché du carbone, des

crédits d'impôts, ou des normes d'émissions. En Europe, le prix de la tonne de CO₂ sur le marché européen d'échange de quotas d'émissions est encore trop bas pour permettre de compenser le coût du captage et stockage de CO₂.

La France est très active sur la recherche dans ce domaine. Elle coordonne actuellement quatre projets européens dont un qui s'intéresse aux perspectives d'application de cette technologie dans 8 zones industrielles du sud et de l'est de l'Europe, dont la vallée du Rhône et le Bassin Parisien. Il s'agit d'identifier des solutions locales de transport,

de valorisation ou de stockage de CO₂ pour des grappes d'émetteurs industriels. Deux autres projets de recherche en Centre Val-de-Loire illustrent bien l'adaptation des projets aux territoires. Le CO₂ issu d'une centrale biomasse et d'une sucrerie pourrait ainsi alimenter des serres agricoles, le surplus étant enfoui sous terre à proximité. Une autre voie explorée consiste à combiner stockage de CO₂ et extraction de chaleur géothermale. Autant de projets qui montrent à quel point le potentiel de développement de ce puits de carbone géologique en France est considérable. Des synergies sont possibles avec des énergies renouvelables (biomasse, géothermie) et avec la production d'hydrogène décarboné à partir de gaz naturel. Il est donc important de réaliser sur le sol métropolitain quelques pilotes et démonstrateurs, comme le préconise la Stratégie Nationale Bas Carbone qui vient d'être révisée.



Vincent VIGUIÉ,
Ingénieur des Ponts eaux et forêts,
École des Ponts ParisTech

BÂTIMENT ET URBANISME

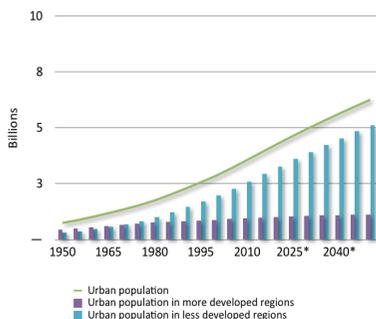
VOIR L'INTERVENTION

Depuis 2007, on estime que plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, part qui continue d'augmenter aujourd'hui : chaque jour, la planète compte 200 000 citoyens supplémentaires. Deux tiers de ces urbains vivent dans des villes de moins d'un million d'habitants. Près des trois quarts des consommations mondiales d'énergie ont lieu en ville. Les autorités urbaines peuvent agir pour réduire cette consommation en sensibilisant la population, en incitant les habitants à modifier certains comportements fortement émetteurs de gaz à effet de serre, et en améliorant les infrastructures. Les villes sont aussi très vulnérables aux effets du changement climatique, du fait de leur forte concentration en population et en activité économique. Elles sont plus exposées aux canicules qui sont renforcées par le phénomène des îlots de chaleur urbain et

subissent des inondations qui sont d'autant plus dangereuses que la ville est densément

peuplée. effet de serre liées à l'énergie. Les solutions techniques existent pour stabiliser, voire

La « fenêtre d'opportunité »



Tous les jours, il y a environ 190 000 citoyens de plus dans le monde

Chaque semaine, cela correspond à un équivalent de l'agglomération lyonnaise en plus

6 fois l'île de France chaque année

Source : World Urbanization Prospects, United Nations
4 Vincent Viguié Bâtiments et urbanisme Académie des sciences 29/01/2020

peuplée.

En 2014, le bâtiment était responsable de 23% des émissions mondiales de gaz à

diminuer cet impact malgré la croissance actuelle de l'urbanisation. Cependant, des barrières financières et organisationnelles rendent difficile la

diffusion de la réponse technologique. De plus, les effets du changement climatique compliquent la donne car le réchauffement en hiver diminue la facture de chauffage quand les fortes chaleurs estivales font grimper la note de climatisation. Au final, une question-clé est la difficulté d'adapter un bâtiment à un environnement très changeant.

Les transports consomment 30% de l'énergie dans le monde en 2014 et émettent 23% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. 40% de ces émissions sont liées au transport urbain. C'est le secteur qui connaît la plus forte progression en termes d'émission de GES. La croissance des ventes de véhicules électriques et de leur utilisation, le développement des différents modes de transport électrique, les initiatives en urbanisme pour déployer la marche, le vélo, les modes doux de déplacement, les transports en commun constituent autant de



perspectives qu'il faut continuer à encourager, et de nombreux exemples sont visibles à travers le monde.

La forme urbaine est un élément clé pour déterminer la densité d'une ville et son efficacité énergétique. Les émissions d'Atlanta qui est une ville très étendue sont très largement supérieures à celles

de Barcelone, ville beaucoup plus dense et dotée d'un réseau de transport en commun plus efficace. La densité facilite les mesures de réduction de gaz à effet de serre mais elle constitue aussi un facteur de vulnérabilité face aux effets du changement climatique et aux nuisances diverses (bruit, dans certains cas pollution de l'air etc.). Dans quasiment tous les cas, mener des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre entraîne d'importants co-bénéfices pour les villes qui en prennent la décision : baisse de la congestion, amélioration de la qualité de l'air...





Jean-François Soussana,
Directeur de recherches, Institut national de
recherche pour l'agriculture, l'alimentation et
l'environnement (Inrae)

UTILISATION DES TERRES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE : AGRICULTURE, ALIMENTATION, ÉNERGIE

VOIR L'INTERVENTION 

Selon le rapport spécial sur les terres et le changement climatique, les usages humains affectent 70% de la surface terrestre libre de glace et créent des concurrences entre usages des terres (alimentation humaine et animale, production de bois, de fibre, d'énergie...). Le changement climatique aggrave ces pressions sur les terres et affecte la sécurité alimentaire via le réchauffement, la variabilité des précipitations et les événements climatiques extrêmes. Par exemple, en 2016 en France la forte pluviométrie et l'engorgement des sols ont réduit les rendements du blé de 30%. L'élevage est également impacté, en particulier les systèmes pastoraux en Afrique, mais aussi dans les régions tempérées lors de fortes chaleurs. Les conséquences du réchauffement climatique sur la répartition et la diffusion des ravageurs et des maladies, notamment les zoonoses, sont aussi importantes.

Avec l'aggravation du réchauffement climatique, la sécurité alimentaire devient de plus en plus incertaine avec des menaces sur la stabilité de l'approvisionnement qui augmentent d'ici à 2050 avec le niveau de réchauffement. De plus, l'augmentation du taux de CO₂ dans l'air fait diminuer la teneur en micronutriments des produits végétaux alors que certaines populations souffrent déjà de carences en micronutriments.

La dégradation des terres se poursuit avec une érosion pouvant être cent fois plus rapide que le taux naturel de formation du sol. Sans ralentissement, cette dégradation pourrait réduire les rendements agricoles de 10% d'ici 2050. Les impacts de cette dégradation sont aggravés par le changement climatique, en particulier dans les

zones côtières basses, les deltas fluviaux et les zones arides. D'autres défis que la dégradation des terres et la sécurité alimentaire doivent être pris en compte : désertification, menaces sur la biodiversité, surexploitation des aquifères, pollution des eaux... Or, ces défis sont en interaction et sont plus nombreux dans les pays à faible indice de développement humain. Les défis les plus importants se concentrent donc dans les pays disposant de la plus faible capacité de réponse. L'adaptation au changement climatique, la transformation des systèmes de production pour atteindre une meilleure résilience demandent des investissements importants et une réduction des vulnérabilités, les populations les plus pauvres étant les plus exposées.

Sachant que 30% des émissions mondiales anthropiques sont liées à l'alimentation, le potentiel d'atténuation est considérable, notamment via la conservation et la restauration des forêts, des zones humides et des sols agricoles dégradés, mais aussi en réduisant les excès de fertilisation ainsi que les pertes et gaspillages alimentaires. Des co-bénéfices pour la santé sont possibles puisqu'en suivant les recommandations nutritionnelles, on peut diversifier les cultures (plus de fruits, de légumes, de noix), diminuer l'excès de consommation de viande et augmenter l'efficacité de la production alimentaire, ce qui réduirait les émissions de gaz à effet de serre et libérerait des millions de kilomètres carrés de terres afin de restaurer la nature et produire des bio-énergies.

Certaines options de gestion durable des terres, comme l'augmentation du stock de carbone organique des sols, génèrent de nombreux co-bénéfices (notamment pour l'atténuation, l'adaptation

et la sécurité alimentaire) sans toutefois produire d'énergie. À l'inverse, les options qui permettent de générer des bio-énergies tout en piégeant le CO₂ (par capture et stockage géologique après combustion de la biomasse) ne créent pas de co-bénéfices pour l'adaptation et la biodiversité et leur déploiement ne serait approprié qu'à une échelle relativement faible (moins de 1 à 4 millions de km²), vu leurs impacts négatifs pour la sécurité alimentaire.

Hausse de la température du climat et conséquences sur les terres



<1°C : pics de prix des denrées agricoles



>1,5°C : chocs périodiques dans certaines régions qui perturberont l'approvisionnement alimentaire



>2°C : risque au niveau global sur la sécurité alimentaire



Quelle quantité de CO₂ pourrait-on stocker en France ?

Isabelle Czernichowski-Lauriol : Les estimations sont encore théoriques, il faudrait caractériser les sites identifiés pour préciser ces estimations. Mais en France comme en Europe, on devrait trouver de quoi stocker 100 ans de nos émissions actuelles. En diminuant ces émissions, on devrait trouver plus de sites que nécessaire.

Comment améliorer le prêt à taux zéro (PTZ) ? Est-ce vraiment une solution ?

Jean-Charles Hourcade : Ce n'est pas l'argent qui manque, mais comment faire passer cet argent de là où il est à des projets fiables. Le mécanisme de distribution doit être amélioré. Pour l'amélioration énergétique des logements, la collectivité devrait servir de garantie publique pour les prêts, mais il y a des questions de groupement entre les maires et les artisans. Il faut améliorer la

garantie publique des prêts et renforcer la formation professionnelle des artisans.

Les nouveaux immeubles proposent des chauffe-eau au gaz ? Est-ce compatible avec la diminution des émissions de CO₂ ?

Vincent Viguié : Dans un objectif de neutralité carbone pour rester en dessous de 1,5°C, le mieux serait le tout électrique d'origine renouvelable. En attendant, en France, compte tenu de l'électricité nucléaire qui émet peu de CO₂, le chauffage au gaz ne devrait pas être la meilleure manière de réduire les émissions de CO₂.
Didier Roux : Mais la loi LT2012 utilise une méthode de calcul de l'énergie qui défavorise le chauffage électrique, c'est l'origine de la faveur attribuée au gaz.

Comment expliquer la corrélation entre énergie et produit intérieur brut (PIB) ?

Jen-Charles Hourcade : Le PIB et une valeur ajoutée (salaires et profits), pas un produit.

Quelle est la quantité d'énergie solaire que la Terre reçoit, comparée à l'énergie consommée ?

Didier Roux : La Terre reçoit 10 000 fois plus d'énergie que ce qui est mondialement consommé, mais la technologie actuelle ne permet d'en récupérer que 10%. De plus, les terres émergées ne représentent que 20% de la surface terrestre dont un tiers est déjà utilisé par l'agriculture.

Quels sont les risques pour le stockage du CO₂ ?

Isabelle Czernichowski-Lauriol : Les risques de fuite sont couverts par une couche argileuse imperméable. L'injection dans le sous-sol est une étape délicate: la pression

ne doit pas être trop élevée pour ne pas risquer de fracturer la couverture rocheuse, mais on sait contrôler cela. Les séismes naturels ne font pas de dégâts en profondeur. Aucune fuite n'a été détectée sur un stockage en cours lors d'un séisme récent au Japon.

Quels sont les bilans carbone et bilans matière des véhicules électriques ?

Nicolas Meilhan : Le cycle de vie total d'une voiture à essence ou diesel émet en moyenne 40 tonnes de CO₂, à comparer aux 20 tonnes nécessaires pour seulement fabriquer un véhicule SUV électrique et sa batterie. Au niveau mondial, 40% de l'électricité est produite à partir de charbon, donc tant qu'on ne décarbonera pas l'électricité de manière significative, le bénéfice de la voiture électrique restera

limité. Par ailleurs, les batteries nécessitent des métaux rares comme le cobalt, qui est presque exclusivement produit en République Démocratique du Congo et raffiné en Chine. La dépendance au pétrole risque donc de glisser vers une autre dépendance.

Dans la compétition sur l'usage des terres, quels sont les compromis possibles ?

Jean-François Soussana : Il serait raisonnable d'affecter 1% des terres agricoles à la captation de carbone et à la production d'énergie à partir de biomasse. Cependant, il faut protéger les forêts et, à horizon 2050, les menaces qui pèsent sur les sols mettront sous tension la sécurité alimentaire au niveau mondial. Dans l'hypothèse d'une population mondiale de 10 milliards d'habitants, il faudrait revoir nos régimes alimentaires et ce 1% resterait difficile à mobiliser.

Y a-t-il des pistes de ruptures technologiques pour le stockage du CO₂ ?

Isabelle Czernichowski-Lauriol : Oui, pour le captage qui représente 80% du coût de l'énergie émettrice de CO₂, des procédés innovants sont à l'étude, par exemple en Chine,

ou aussi au BRGM à Orléans où un procédé qui n'utilise que l'eau comme solvant est à l'étude.

Faut-il interdire la publicité pour les SUV et autres produits fortement émetteurs de CO₂ ?

Nicolas Meilhan : La marge économique des constructeurs est proportionnelle au poids de la voiture. Plus elle est lourde, plus les constructeurs gagnent de l'argent. Dans ce cadre, un bonus-malus sur le poids des véhicules grèverait de facto les marges financières aujourd'hui allouées à la publicité. La taxe carbone est difficile à mettre en place. En dehors du bonus-malus, les normes permettent d'orienter la consommation vers des produits vertueux.

La norme est-elle un bon instrument pour sauver le climat ?

Jean-Charles Hourcade : Les normes sont un outil nécessaire, en complément d'une régulation par les prix. Cependant, pour sauver le climat, il faudrait que les couches moyennes chinoises, indiennes, brésiliennes aient accès à un mode de vie à la fois désirable et compatible avec les objectifs climatiques.



Session IV - Production d'énergie décarbonée et stockage

Le monde de demain compatible avec un réchauffement limité à +1,5°C inclut nécessairement de produire de l'énergie décarbonée, à partir d'énergies renouvelables ou nucléaire. La place des énergies éolienne et photovoltaïque sera prépondérante car ce sont celles qui recèlent le potentiel de développement de loin le plus élevé. Si la production électrique des pays est entièrement décarbonée, c'est à chaque pays de déterminer comment composer son mix électrique entre les différentes énergies renouvelables dont les coûts de production ne cessent de baisser et qui pourraient jouer un rôle bien plus important dans l'approvisionnement énergétique des transports.

Par ailleurs, l'énergie nucléaire reste une technologie décarbonée fiable et dont les risques d'impact sur la santé sont particulièrement faibles par rapport à l'énergie produite. Malgré les coûts de démantèlement et de gestion de déchets radioactifs, c'est une énergie compétitive et qui le deviendra encore plus lorsque les promesses d'innovation technologique permettront au combustible fissile existant d'être exploité pour des centaines d'années supplémentaires, tout en réduisant d'autant les déchets à traiter.

Le développement annoncé des énergies renouvelables et des véhicules électriques oblige à améliorer les technologies de stockage électrique sur batteries. Leur production devra être plus éthique et intégrer des matériaux moins rares et surtout elles devront être plus performantes en tolérant des décharges beaucoup plus importantes.

Au delà des dimensions technologiques, la lutte contre le changement climatique appelle à des changements sociétaux majeurs, à commencer par une éducation au phénomène qui soit beaucoup plus large. Les scientifiques accompagneront les enseignants pour acquérir ces connaissances et disposer de ressources pédagogiques adaptées. Le problème mondial du changement climatique suppose également un questionnement des droits fondamentaux pour qu'ils intègrent les interdépendances des humains entre eux et avec les autres formes de vie sur lesquelles reposent nos sociétés.



présidé par
Jean Jouzel
Académie des sciences





Philippe MALBRANCHE
Ingénieur, Institut National de l'Énergie
Solaire

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES : PRODUCTION, RESSOURCES, INTERMITTENCE, COÛTS, DURABILITÉ

VOIR L'INTERVENTION ▶

Le plus grand potentiel de développement des énergies renouvelables provient des énergies variables intermittentes, à savoir le solaire photovoltaïque et l'éolien. En effet, après 40 ans de recherche et d'innovations, ces énergies sont devenues les sources d'électricité les moins chères pour la plupart des applications et des pays. Dans les régions à plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, le courant y est produit à moins de 2c€/kWh, comme le montre le dernier record mondial est à 1,35 c\$/kWh en Arabie Saoudite, le précédent étant 1,6 c€/kWh au Portugal. Dans les régions moins ensoleillées comme le Nord de la France, il est entre 4 et 5c€/kWh. Les multiples technologies solaires disponibles, au silicium ou en couches minces, se sont concurrencées entre elles en termes de rendement, de durée de vie et de coûts de fabrication et ont permis de diminuer les prix de 80% sur les dix dernières années. Au prix du mètre carré, le panneau solaire photovoltaïque coûte maintenant deux fois moins cher que de l'ardoise et ces prix vont continuer à baisser (prix estimé du kWh en 2050 : entre 0,50 et 1c/kWh).

Cette forte baisse des coûts se révèle être une aubaine pour les pays pauvres qui sont aussi ceux qui bénéficient du plus fort ensoleillement. Dès que les financements sont mis en place, cela change la vie de millions de personnes qui ont ainsi accès à un éclairage plus économique, à des pompes à eau ou à des recharges de téléphones mobiles. Du côté des applications industrielles, la valorisation locale des matières premières ou la production économique d'hydrogène propre va devenir possible et permettre à minima une réduction des importations de fossiles, puis une augmentation des exportations.

Pour les pays riches, ces énergies vont concurrencer directement, ou indirectement via l'hydrogène et d'autres combustibles plus propres, les énergies fossiles tout simplement en plafonnant leur valeur. Du fait du remplacement progressif de ces fossiles, ces énergies variables qui représentent aujourd'hui 3% de l'énergie mondiale devraient fournir entre 50% et 70% des demandes d'énergie en 2050, en diffusant progressivement dans tous les secteurs comme le transport, l'industrie et l'agriculture.

Le problème de l'intermittence, souvent évoqué au regard de la stabilité des réseaux électriques, se solutionne par une multitude de moyens à disposition : la conception et l'efficacité énergétique des systèmes, le foisonnement, la complémentarité entre le solaire et l'éolien, l'écrêtement, la gestion de la demande, notamment celle effaçable comme le pompage ou la production d'hydrogène, les interconnexions des réseaux de gaz et d'électricité et les stockages,

sans oublier les centrales conventionnelles reconverties avec des combustibles propres. La question des surfaces disponibles n'est pas non plus un sujet : Soit il s'agit de grandes centrales, auquel cas les panneaux sont situés en plein désert, sur des surfaces inutilisées ou sur des lacs. Soit ils peuvent recouvrir les toitures des maisons, d'immeubles, d'industries, ou les véhicules, sachant que chaque mètre carré produit environ 200kWh ou de quoi parcourir au moins 1000km par an. Idem pour les ressources de matières disponibles puisque la fabrication des modules photovoltaïques ne requiert aucun matériau rare.

Pour tirer les meilleurs avantages socio-économiques de cet usage accru des énergies renouvelables, en termes de création d'emploi, de balance des paiements, ou de pouvoir d'achat de chacun, il faut garder à l'esprit qu'il n'existe pas de solution ni de cheminement unique. C'est à chaque pays de choisir son mix optimal et ses priorités, en fonction de ses ressources climatiques et industrielles, des contextes réglementaires encore souvent défavorables et des diverses demandes sectorielles. Leur vitesse de déploiement peut être particulièrement rapide dès lors que l'ensemble des acteurs de la société, citoyens, collectivités territoriales, administrations et entre-

prises, s'y investit pleinement et avec ambition, pour apporter ainsi une excellente solution aux enjeux environnementaux et climatiques.

“Les énergies renouvelables intermittentes qui représentent aujourd'hui 3% de l'énergie mondiale devraient fournir entre 20% et 70% des demandes d'énergie en 2050”



Yves BRÉCHET

Physicien, Monash University, Mc Master University,
Saint Gobain, Académie des sciences

ENERGIE NUCLÉAIRE : ATOUTS ET FAIBLESSES, NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE INTÉGRÉE

VOIR L'INTERVENTION 

Changement climatique,
le champ des possibles
de l'Académie des sciences

Alors que 69% de la population française pense que l'industrie nucléaire émet du CO₂, il est crucial de rappeler que l'intensité carbone de la production de l'électricité en France est particulièrement basse grâce à l'importance de son parc nucléaire. Pour mémoire, une centrale nucléaire est une centrale à vapeur dont la source de chaleur a pour origine la fission d'atomes.

Il y a eu dans l'histoire quatre accidents nucléaires. Celui de Tchernobyl a causé entre 4 000 et 5 000 décès, mais celui de Fukushima n'a tué personne car c'est le Tsunami à l'origine de l'accident qui a fait 20 000 morts. Le nombre de morts à venir liées de la radioactivité ne devrait pas dépasser la centaine et s'étaler dans les décennies à venir. En calculant les ratios nombre de morts/kWh, la dangerosité des différentes formes d'énergie devient comparable. Il apparaît ainsi clairement que

la lignite ou le charbon sont beaucoup plus nocifs que le nucléaire.

Seule une petite partie de l'uranium naturel est adaptée au fonctionnement des centrales nucléaires. Cet uranium est enrichi avant

d'autant les déchets associés. Aujourd'hui, pour une tonne de combustible d'uranium consommée, 35 kgs de produits de fission sont produits auxquels s'ajoutent 10 kgs de plutonium ainsi que 1 kg d'actinide mineur à très longue durée de vie qu'il est possible de vitrifier. Tous

d'être utilisés dans une centrale pendant trois ans, au bout desquels il devient un déchet à traiter. Avec la technologie actuelle, les réserves d'uranium permettraient encore un siècle de production. Si les recherches sur les centrales à neutrons rapides aboutissaient, ces mêmes quantités d'uranium pourraient être réutilisées mille fois plus longtemps, réduisant

ces déchets nucléaires qui sont actuellement stockés en surface à l'usine de La Hague pourraient être enterrés en grande profondeur, sous des couches argileuses (stockage géologique profond).

Sur les 149 centrales en arrêt définitif en 2013, 119 démantèlements sont en cours dont 6 où la radio-activité a

été ramenée à 0. Dès lors, trois situations distinctes apparaissent. Les installations en série sont relativement faciles à défaire et nécessitent pour cela dix fois moins de bras qu'il n'en faut pour la faire fonctionner. Les installations uniques s'avèrent plus difficiles et plus coûteuses, car elles nécessitent des stratégies au

pour faire baisser les coûts. Le coût de production du MWh pour du nucléaire ancien s'établit entre 45 et 80 € alors qu'il est fixé entre 100€ et 170€ pour le nucléaire nouveau.

Le nucléaire consomme relativement peu de matière au regard de la grande quantité d'énergie qu'il produit. Toute

déjà disponibles, et de lancer des programmes de recherche cohérents pour les solutions à venir. Dans ce cadre, l'énergie nucléaire qui fournit déjà une énergie stable et décarbonée en quantité, qui consomme peu d'énergie, peu d'espace et de matière mérite une stratégie fiable sur le long terme de la part des investisseurs publics. Il convient également de mentionner que la coexistence des EnR et du nucléaire soulève des questions de « flexibilité du parc » qui impliquent des adaptations de réseaux, de moyens de stockage, de gestion des centrales.

coup par coup. Il n'existe pas en revanche de procédure connue pour démanteler des installations accidentées.

Si le réacteur de Flamanville coûte trois fois plus cher que prévu (11 milliards), c'est parce que le tissu industriel capable de construire ces usines s'est retrouvé désœuvré trop longtemps. Il doit être retrouvé

politique énergétique nécessite une vision à long terme. Un changement de politique énergétique ne peut se faire sans un engagement fort de l'État et sur une durée de trente ans environ. Le numérique qui représente 5 à 10 % de la consommation électrique mondiale est en forte croissance. L'urgence du problème climatique nécessite à la fois de déployer des solutions

“Sur les quatre accidents nucléaires majeurs, seul celui de tchernobyl a causé des morts”



Jean-Marie TARASCON
Chimiste, Collège de France,
Académie des sciences

Les batteries électriques font ainsi partie du panel de solutions à déployer pour lisser les productions d'énergie d'origine renouvelable et leur permettre de se développer. Elles sont également indispensables pour la mobilité électrique du futur. Dans cette perspective, la technologie du lithium-ion s'avère la plus grande avancée électrochimique du 20^{ème} siècle, tant du point de vue de l'autonomie que de la durée de vie. Cependant, la loi de Moore (doublement des capacités tous les 18 mois) s'applique difficilement aux batteries car la chimie impose des contraintes fortes aux gains de densité d'énergie. La liaison chimique n'a guère plus que 2 électrons à fournir ce qui en constitue une limite intrinsèque.

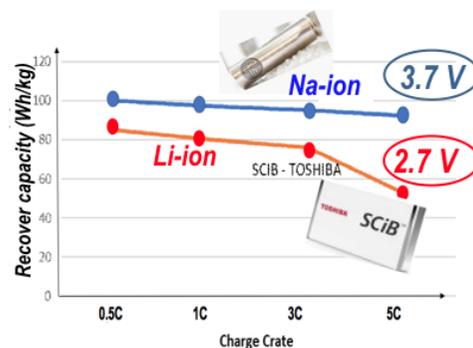
En prenant en compte toutes les étapes de cycles de vie d'une batterie, produire 1 kWh de batterie nécessite 327 kWh

LES BATTERIES SONT-ELLES LA BONNE OPTION POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE ?

VOIR L'INTERVENTION 

d'énergie et rejette de 90 kg de CO₂. Ces performances peuvent être améliorées grâce à de nouveaux procédés de fabrication moins consommateurs d'énergie, grâce aussi à l'application de nouvelles chimies moins impactantes pour l'environnement. La recherche s'évertue également

à trouver des matériaux alternatifs au cobalt, dont la production au Congo s'avère peu éthique et trop sensible aux aléas géopolitiques. Les solutions constituées de 80% de manganèse et de 20% de cobalt-nickel semblent prometteuses. Il est question aussi de travailler sur des batteries



Les cellules Na-ion affichent des performances qui se comparent favorablement à celles des cellules Li-ion SCiB tout en ayant une tension de sortie plus élevée

intelligentes à la durée de vie plus longue. Des récents tests en accéléré affichaient des résultats très encourageants d'un générateur ion-lithium permettant à un véhicule de parcourir 3 millions de kilomètres sur 25 ans. Une autre avancée intéressante sur les performances concerne la technologie tout solide car elle supprime les risques d'explosions et offre une densité énergétique bien plus élevée que le lithium-ion. Cependant, la commercialisation de cette technologie ne se ferait pas avant 2030.

Sans détrôner encore la technologie ion-lithium, celle du sodium-ion présente un fort potentiel. Le sodium s'avère plus abondant que le lithium, il affiche de bonnes performances en température et en puissance avec la possibilité d'être déchargée jusqu'à 0 volt sans que son fonctionnement extérieur en soit modifié. Compte tenu de ses temps de charge et de décharge rapide

mais de sa densité d'énergie volumétrique faible, la batterie sodium-ion s'appliquerait mieux aux énergies renouvelables, moins de contrainte d'espace, qu'à la voiture électrique. Une filière française de batteries au sodium-ion est en cours de développement. Des premiers jalons sont posés en Picardie.

Imaginer des batteries dotées d'une double fonctionnalité, qui alimenteraient des voitures électriques et qui une fois usagées, serviraient comme unité de stockage d'énergie renouvelable constitue une piste privilégiée pour allonger le temps d'utilisation des batteries. La condition de réussite de cette seconde vie serait un suivi de la qualité de la batterie tout au long de sa durée de vie. Une autre voie pour les batteries du futur serait d'intégrer des capteurs qui, lors de la détection d'un fonctionnement defectueux, déclencheraient des agents autoréparants. Ces innovations

permettraient de repousser l'âge de recyclage des batteries. En effet, à partir de 2025, il y aurait besoin de recycler 700 GWh de batteries par an, soit 5 millions de tonnes. Une telle quantité nécessite de repenser les méthodes classiques de recyclage (pyrométallurgie et hydrométallurgie) pour imaginer une autre configuration des batteries, pour passer d'une configuration par feuillets à une configuration par « briques de légo ».



Pierre LÉNA
Astrophysicien, Office for Climate
Education, Académie des sciences

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ÉDUCATION

VOIR L'INTERVENTION ▶

La jeunesse doit se préparer à affronter les enjeux du monde de demain et pour ce faire, il lui est indispensable de se procurer les connaissances requises. Pour soutenir la transition climatique, le rôle de l'éducation est central, comme le montre l'article 12 de l'Accord de Paris, signé lors de la COP21 : « Les Parties doivent prendre des mesures pour développer la place du changement climatique dans l'éducation », et ceci repose sur les faits décrits par la science. Face à la dégradation de l'environnement, les jeunes générations sont mobilisées, mais elles ne maîtrisent pas suffisamment les concepts scientifiques liés au changement climatique et sous-estiment combien le sujet fait consensus au sein de la communauté scientifique. Leur prise de conscience demande donc à être accompagnée.

Enseignants et scientifiques jouissent à leurs yeux d'une grande crédibilité pour leur communiquer la réalité de la transition climatique, pour leur permettre d'agir de façon informée et positive. Désormais, nombre de jeunes veulent choisir leur formation et leur avenir en fonction des questions environnementales. Ainsi, il est encourageant de voir fleurir des

projets innovants, comme cette initiative des 12 campus de Californie qui ont intégré à leur programme un curriculum commun sur les enjeux et les solutions face au changement climatique. Au niveau mondial, l'éducation au changement climatique reste très faible. Une enquête de l'UNESCO indique que dans près de 100 pays, 50% des

classes ignorent le terme environnement, deux tiers d'entre elles ignorent le changement climatique et 90% d'entre elles n'incluent pas ces thèmes dans la formation des enseignants. Une première difficulté est le très grand nombre d'enseignants à former dans tous les pays. En Afrique, la priorité reste de recruter des dizaines de millions d'enseignants supplémentaires d'ici 2030. Le second problème réside dans la complexité des concepts scientifiques à intégrer, car elle nécessite une approche multidisciplinaire et systémique. Il y a

grand besoin d'installer ce sujet dans les programmes, de former et accompagner les professeurs, enfin de leur donner des ressources pédagogiques. En France, le nouveau programme du lycée général (1ère et Terminale) prévoit plusieurs dizaines d'heures de cours, pour donner une vision scientifique et systémique du sujet à tous les élèves quelle que soit leur spécialité, mais rien encore de semblable pour les voies professionnelles ou technologiques. Pour les enfants de primaire et de collège, les enseignements incluront la compréhension du climat, de la biodiversité et de la soutenabilité, ce qui implique d'accompagner un très grand nombre d'enseignants. Il faut donc accompagner les enseignants, en France et dans le Monde, pour que leurs élèves puissent conjuguer la connaissance des faits et risques avec les perspectives positives d'action et les valeurs de solidarité et de justice climatique. C'est pourquoi le réseau mondial des Académies

des sciences a initié en 2018 la création, en France, de l'Office for Climate Education. Il a pour ambition de développer cet enseignement, s'appuyant sur une pédagogie d'investigation. Celle-ci, qui repose sur des élèves actifs et des professeurs accompagnés autour du contenu scientifique, s'avère d'autant plus pertinente qu'elle prend en compte la diversité des contextes éducatifs, culturels et économiques des pays. De premières publications, des ateliers de formation, de grandes conférences régionales en ont déjà découlé, s'appuyant sur une déclinaison de chaque rapport du GIEC, conçue ici à destination des professeurs. L'Europe pourrait à son tour s'emparer de ce sujet en finançant un vaste chantier d'éducation au changement climatique. Ce serait un riche et nouveau défi pour la communauté scientifique européenne.

LE CLIMAT, MA PLANÈTE ET MOI

UN PROJET INITIÉ PAR
LE CENTRE PILOTE LA MAIN A LA PÂTE
ET LE RÉSEAU D'ÉDUCATION PRIORITAIRE DE NOGENT-SUR-OISE
AVEC NICOLAS DEMARTHE ET SON ÉQUIPE
EN PARTENARIAT AVEC



Mireille
DELMAS-MARTY

Mireille DELMAS-MARTY
Juriste, Collège de France, Académie
des sciences morales et politiques

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, UNE CHANCE POUR L'HUMANITÉ?

VOIR L'INTERVENTION

Parmi les nombreux défis globaux qui existent aujourd'hui, le changement climatique se différencie des autres car c'est dans ce domaine que la gouvernance mondiale a fait le plus de progrès. Il se pourrait donc que la lutte contre le changement climatique offre à l'humanité l'occasion d'un sursaut pour éviter le repli sur les Etats nations ; aussi pour prendre conscience du destin commun des nations et reconnaître l'urgence d'une gouvernance mondiale. Du national au mondial, le changement d'échelle aggrave en effet les difficultés. Il multiplie l'incertitude des liens de causalité entre le fait générateur de risque et le dommage, entraînant l'incertitude des effets ; en outre il accroît l'imprévisibilité des comportements humains, stimulant une créativité qui

“Reconnaître les interdépendances des humains entre eux et des humains avec les non-humains est une nécessité pour répondre aux enjeux du changement climatique”

empêche de déduire l'avenir de la situation précédente. Quant aux réponses, le changement climatique permet de tester leur diversité, montrant que, face au risque d'irréversibilité du dommage, la punition est tardive et la réparation imparfaite. Il faut donc tenter d'adapter nos systèmes normatifs dans le domaine juridique, politique, anthropologique.

Dans le domaine juridique, les Accords de Paris sont remarquables car ils constituent un espace normatif à géographie

variable et à plusieurs vitesses. Les pays signataires ont reconnu des objectifs communs, et d'abord une limitation de la hausse de la température mondiale. Mais ils ont une responsabilité historique différente à cet égard et leurs niveaux de développement sont très inégaux. Pour prendre en compte ces « responsabilités communes mais différenciées », il fallait réussir à intégrer dans ces accords des niveaux normatifs très différents mêlant les droits international, supranational (régional et mondial), mais aussi national et infranational. Il fallait

apprendre à utiliser la complexité normative pour obtenir un droit souple, combinant Soft Law (flou, mou et doux) et Hard Law (précis, obligatoire et sanctionné) et les variantes, comme l'Accord de Paris : précis mais doux (non sanctionné) et mou (à peine obligatoire). On regrette qu'il n'existe pas de critère commun pour différencier les responsabilités ; alors qu'il aurait été possible d'explicitier, par exemple, des critères sociaux liés à la lutte contre les exclusions, ou des critères géographiques pour prendre en considération les différentes vulnérabilités des territoires nationaux. Une autre piste juridique pour responsabiliser les acteurs vient des procès climatiques. Au Pays-Bas, un collectif de 800 citoyens a par exemple porté plainte contre l'Etat néerlandais auquel il reprochait de ne pas respecter ses engagements internationaux en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre. Le collectif a gagné son procès (Urgenda 2015), qui a été confirmé en

appel et à la cour suprême. L'affaire Total sera également à suivre en France : il est reproché à l'entreprise d'être responsable d'1% des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Sur le plan politique, la solution pourrait émerger d'une reconnaissance des interdépendances, entre elles et avec les non humains. Elle s'accompagnerait d'une nouvelle gouvernance SVP qui agrégerait le Savoir (connaissances scientifiques et expérience vécue des populations) avec le Vouloir des citoyens pour encadrer les Pouvoirs (politiques et économiques)

Accepter ces interdépendances pourrait conduire à une refondation anthropologique. L'émancipation de l'individu héritée de l'humanisme des Lumières serait complétée de nouveaux droits de solidarité. Ce ne serait ni le récit-promesse des droits de l'homme, ni celui des marchés autorégulés, ni le récit numérique de

l'homme augmenté, ni celui de l'effondrement de la planète ; mais une combinaison de tous ces récits pour promouvoir le récit d'une mondialité apaisée, par opposition à la mondialisation sauvage.

En conclusion, nous avons appris que la Terre n'est pas le centre du système solaire, qui lui-même n'est pas le centre du monde. Nous découvrons à présent que l'humanité n'est pas le centre de l'écosystème Terre, mais une simple composante. Il est vrai qu'il s'agit de la seule composante « responsable » car douée, si l'on en croit la DUDH, de raison et de conscience. Alors, oui, le changement climatique est bien une chance pour l'humanité s'il lui apprend à se gouverner avec suffisamment de sagesse pour que la terre demeure habitable par les vivants, humains et non humains, et reste la demeure commune des générations présentes et futures.



Quelle quantité d'énergie éolienne et photovoltaïque faudrait-il pour obtenir une électricité neutre en carbone ?

Philippe Malbranche : L'étude ADEME estime qu'une électricité 100% d'origine renouvelable contiendrait 20% de son énergie du photovoltaïque et 50% de l'énergie éolienne. Cette étude suppose que des moyens de stockage conséquents soient mis en place.

Pourquoi avoir arrêté le programme de neutrons rapides appelé Astrid ?

Yves Bréchet : L'arrêt d'Astrid a été décidé pour des raisons budgétaires est une erreur historique car la technologie des neutrons rapides est indispensable au maintien d'une production nucléaire sur le long terme. Si la France continue à consommer de l'énergie nucléaire dans 50 ans, alors elle sera contrainte d'acheter

cette technologie à l'extérieur, la Chine par exemple.

Quelles sont les avancées de la fusion nucléaire ?

Yves Bréchet : Il est important de continuer à travailler dessus mais c'est un projet d'une très grande complexité. Le chantier est d'une telle difficulté scientifique que cela ne peut être considéré comme une solution raisonnablement atteignable à moyen ou long terme.

Le vanadium utilisé dans certaines technologies de batteries est-il une ressource rare ?

Jean-Marie Tarascon : Effectivement, il faudrait trouver une solution de remplacement. Des recherches sont en cours pour trouver des alternatives au vanadium. Un mix de cuivre et de manganèse constitue une première piste à développer.

Les contrôles de charge et de décharge des batteries

Le débat de la session 4

des voitures électriques sont-ils déjà une première forme d'intelligence artificielle appliquée à la chimie des batteries ?

Jean-Marie Tarascon : Cela permet de mieux gérer la durée de vie des batterie mais le terme « intelligence artificielle » me semble quelque peu exagéré. Il est possible d'adapter les capteurs au milieu chimique agressif des batteries, leur utilisation systématique permettraient aux

batteries d'être utilisées à 90% ou 95% de leur potentiel au lieu des 70% aujourd'hui dans le meilleur des cas.

Comment concilier la formation monodisciplinaire des enseignants à la formation multidisciplinaire nécessaire à l'éducation au changement climatique ?

Pierre Léna : Trois pistes doivent être privilégiées. Il est d'abord envisageable d'assouplir les cloisons disciplinaires dans

la formation des enseignants pour développer la vision systémique. Ensuite, au sein des établissements scolaires, il faut encourager le dialogue et le travail collaboratif entre les professeurs des disciplines desquelles relève le changement climatique. Donner davantage d'autonomie aux enseignants peut aussi faciliter ce décloisonnement. Enfin, le secteur de l'éducation doit aussi être accompagné par les scientifiques qui devront trouver

des réponses en termes de transmission des savoirs et qui devront être à l'échelle des enjeux.

Les droits de solidarité peuvent-ils être supérieurs aux droits humains ?

Mireille Delmas-Marty : Les différents humanismes qui ont jalonné l'histoire ne se sont pas succédés mais se sont surajoutés les uns aux autres. L'humanisme de la relation s'est enrichi de l'humanisme des lumières. Ce dernier, également appelé humanisme de l'émancipation est un bien précieux à conserver, mais il ne suffit pas pour répondre aux enjeux du changement climatique. Il faut y ajouter un humanisme des interdépendances qui entraîne de la solidarité entre humains et de la solidarité d'ordre écologique.



ÉCHANGES ENTRE ÉTUDIANTS ET SCIENTIFIQUES

animés par Cédric Villani et Serge Planton



Afin d'enrichir les débats et les points de vue, l'Académie des sciences a demandé à une vingtaine d'étudiants (Ecole polytechnique, Ecole normale supérieure), doctorants et post-doctorants, aux parcours de formation ou aux activités de recherche orientés vers des thématiques liées au changement climatique et touchant à diverses disciplines ou domaines (sciences physiques, sciences économiques, urbanisme, transports, ...), de livrer en fin de colloque les réflexions et questions qu'ils souhaitaient adresser aux scientifiques. La vidéo ci-contre relate ces échanges, instructifs et fructueux.



Conclusion et clôture du colloque



SAS le Prince Albert II,
Prince souverain de Monaco



Laurent FABIUS,
président du Conseil constitutionnel



Étienne GHYS,
mathématicien, CNRS,
Ecole normale supérieure de Lyon,
Académie des sciences

Ce document est édité par l'Académie des sciences

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.



*Ce document a été réalisé par Terre21,
avec l'aide d'Original Communication*