



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Face au changement climatique, le champ des possibles

Mardi 28 et mercredi 29 janvier 2020
Auditorium André et Liliane Bettencourt
3, rue Mazarine, 75006 Paris

Notre planète se réchauffe, l'acidité des océans augmente, la sécheresse sévit par-ci et les pluies torrentielles par-là, les forêts prennent feu, les ouragans battent tous leurs records, les glaciers disparaissent, la biodiversité recule...

Réunis à Paris en 2015 pour une 21^e édition de la COP (conférence des parties) les pays du monde entier avaient reconnu la responsabilité humaine dans ce changement climatique et proposé de limiter le réchauffement nettement en dessous de 2 °C par rapport aux années 1880-1900. Pour y parvenir, chaque pays avait présenté des transitions énergétiques ambitieuses. Mais quatre ans plus tard, les transports, l'habitat, l'activité industrielle et agricole émettent toujours plus de gaz à effet de serre, et l'objectif semble hors d'atteinte.

Il faudra s'adapter au réchauffement mais les transitions énergétiques doivent être engagées d'urgence sur la base de solutions réalistes. Cela nécessite des efforts solidaires, de la recherche et beaucoup d'information.

Au lendemain de la COP25 tenue en Espagne sous la présidence du Chili, et à l'occasion de ce colloque ouvert à tous, l'Académie des sciences propose au public de venir débattre des problèmes scientifiques, sociaux et politiques qui se posent à nos sociétés.

Avec le soutien de



Les organisateurs du colloque



Sébastien BALIBAR

Physicien, CNRS, Ecole normale supérieure, Académie des sciences

Sébastien Balibar est directeur de recherches émérite au département de Physique de l'ENS (Paris). Après avoir découvert que l'évaporation de l'hélium dit « superfluide » était analogue à l'effet photoélectrique qui valut le prix Nobel à Einstein, il s'est intéressé à de nombreuses autres propriétés des liquides et des solides quantiques. En collaboration avec Philippe Nozières, il a démontré l'origine des facettes à la surface des cristaux. Il a aussi mesuré la limite extrême de la cavitation dans deux liquides modèles : l'hélium et l'eau. Plus récemment il a découvert que l'élasticité d'un solide quantique peut disparaître à très basse température s'il est infiniment pur. Il a enseigné à Harvard, Konstanz et Kyoto. Il a reçu de nombreux prix dont le prix London en 2005. Parmi différents livres d'information scientifique, il a écrit le livre *Climat : y voir clair pour agir* en 2015.



Jean JOUZEL

Climatologue, CNRS, CEA, Académie des sciences

Jean Jouzel est l'une des grandes figures de la lutte contre le réchauffement climatique. Spécialiste des glaces du Groenland et de l'Antarctique, il a pris part à de nombreux programmes de forages polaires visant à reconstituer le climat terrestre passé. Ses travaux ont apporté tout un ensemble d'informations sur le lien entre climat et effet de serre, l'existence de variations climatiques rapides, ... incontournables vis à vis de l'évolution future de notre climat. Il a reçu la médaille d'or du CNRS en 2002, dirigé l'Institut Pierre-Simon-Laplace de 2000 à 2008 et présidé le Haut Conseil de la science et de la technologie de 2009 à 2013. Il est actuellement président de Société météorologique de France et de l'association du Train du Climat.



Hervé LE TREUT

Climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace, Académie des sciences

Les travaux d'Hervé Le Treut portent sur la modélisation numérique du système climatique et la compréhension des perturbations radiatives du climat, en particulier le rôle de l'effet de serre additionnel lié aux activités humaines. L'étude des impacts des changements climatiques et l'analyse des risques environnementaux associés, sous une forme qui permette leur usage dans le domaine socio-économique, constituent une prolongation naturelle de ces travaux. Il a participé aux travaux du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) jusqu'en 2013, a dirigé l'Institut Pierre-Simon-Laplace de 2009 à 2019, et il conduit en Nouvelle-Aquitaine un travail consacré au rôle des territoires face au réchauffement à venir, le projet Acclimaterra. Il a présidé le comité d'organisation du colloque *Our Common Future under Climate Change* qui a précédé la COP21.

Programme

Mardi 28 janvier

09:00 **Accueil**

09:45 **Introduction**

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

Session I

Face au constat, quelles solutions

Président de séance: Étienne Ghys

09:50 **Réchauffement climatique : état des lieux, causes, impacts, risques**

Valérie MASSON-DELMOTTE, physicienne, Institut Pierre-Simon Laplace

10:20 **Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations, enjeux sociétaux et leçons pour la décision**

Céline GUIVARCH, ingénieur en chef des Ponts, Ecole des Ponts ParisTech

Henri WAISMAN, économiste, Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri)

11:00 **Pause café**

11:30 **Anticiper l'évolution des territoires**

Hervé LE TREUT, climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace, Académie des sciences

12:00 **Débat**

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

12:30 **Déjeuner libre**

Session II

Changement climatique, risques et enjeux

Président de séance : Jean-Claude Duplessy

14:00 **Changement climatique, risque et enjeux : le rôle des observations**

Anny CAZENAVE, géophysicienne, Observatoire Midi-Pyrénées, *International Space Science Institute*, Académie des sciences

14:20 **L'océan de l'anthropocène**

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

- 14:40 **Modèles et projections**
Olivier BOUCHER, climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace
- 15:00 **Evolution des technologies des données : opportunités et défis pour la simulation et l'analyse du système Terre**
Venkatramani BALAJI, géophysicien, Princeton University, Institut Pierre-Simon Laplace
- 15:20 Pause café
- 15:50 **Evènements extrêmes**
Sonia SENEVIRATNE, climatologue, ETH Zurich
- 16:10 **Changement climatique et biosphère**
Isabelle CHUINE, écologue, Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE)
- 16:30 **Débat**
Animateur : Jean-Claude DUPLESSY, géochimiste, CNRS, Académie des sciences
- 17:00 Fin de la première journée

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

- 09:30 **Energie 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 technologies, Académie des sciences
- 09:55 **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
- 10:20 **Décarboner le transport : véhicules électriques ou à hydrogène, transport aérien, transport maritime**
Nicolas MEILHAN, ingénieur, France Stratégie
- 10:40 Pause café

- 11:10 **Captage et stockage du CO₂**
Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL, ingénieure géologue, BRGM, service géologique national, CO₂GeoNet
- 11:30 **Bâtiments et urbanisme**
Vincent VIGUIÉ, ingénieur des Ponts eaux et forêts, Ecole des Ponts ParisTech
- 11:50 **Utilisation des terres et changement climatique : agriculture, alimentation, énergie**
Jean-François SOUSSANA, ingénieur agronome, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)
- 12:10 **Débat**
Animateur : Sébastien BALIBAR, physicien, CNRS, Ecole Normale Supérieure (Paris), Académie des sciences
- 12:30 Déjeuner libre

Session IV

Production d'énergie décarbonée et stockage ; conclusion

Président de séance : Jean Jouzel

- 14:00 **Les énergies renouvelables : production, ressources, intermittence, coûts, durabilité**
Philippe MALBRANCHE, ingénieur, Institut National de l'Énergie Solaire
- 14:25 **Energie nucléaire : atouts et faiblesses, nécessité d'une approche intégrée**
Yves BRÉCHET, physicien, *Monash University, McMaster University, Saint Gobain, Académie des sciences*
- 14:50 **Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?**
Jean-Marie TARASCON, chimiste, Collège de France, Académie des sciences
- 15:15 Pause café
- 15:45 **Changement climatique et éducation**
Pierre LÉNA, astrophysicien, *Office for Climate Education, Académie des sciences*
- 16:05 **Le changement climatique, une chance pour l'humanité ?**
Mireille DELMAS-MARTY, juriste, Collège de France, Académie des sciences morales et politiques
- 16:25 **Débat final et intervention de jeunes participants**
Animateurs : Cédric VILLANI, mathématicien, député de la 5e circonscription de l'Essone, Académie des sciences et Serge PLANTON, climatologue, Météo-France, association Train du Climat
- 17:10 **Conclusions**
SAS le Prince Albert II, Prince souverain de Monaco
Laurent FABIUS, président du Conseil constitutionnel
- 17:40 **Clôture du colloque**
Étienne GHYS, mathématicien, CNRS, Ecole normale supérieure de Lyon, Académie des sciences

Résumés

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

par Valérie MASSON-DELMOTTE, physicienne, Institut Pierre-Simon Laplace

Cette présentation fera le point sur le changement climatique, sur la base de 3 rapports spéciaux du GIEC publiés en 2018 et 2019. Ces rapports, rédigés par environ 300 chercheurs du monde entier, fournissent le meilleur état des connaissances, à partir de l'évaluation critique d'environ 20 000 publications scientifiques. La rigueur, l'exhaustivité et l'objectivité de cette évaluation ont bénéficié de la relecture critique effectuée par plusieurs milliers d'autres chercheurs, qui ont fourni plus de 70 000 commentaires de relecture sur les versions successives des rapports.

Ces rapports fournissent des évaluations intégrées à travers les différentes disciplines scientifiques, et, pour la première fois, sont rédigés par des scientifiques de différentes disciplines dans chaque chapitre. Ils font le point sur les changements observés et leurs causes, sur les opportunités et risques futurs, en fonction de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, des choix de développement socio-économiques, et sur les solutions en matière d'action climat au service d'un développement soutenable, permettant de préserver la biodiversité, et de permettre à tous de vivre dignement.

Le premier rapport spécial SR15 (octobre 2018) porte sur les impacts associés à un réchauffement planétaire de 1,5°C, ainsi que les trajectoires compatibles d'émissions de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la réponse au changement climatique, du développement soutenable et des efforts pour éradiquer la pauvreté : www.ipcc.ch/report/SR15 .

Le second rapport spécial SRCCL (août 2019) porte sur le changement climatique et l'utilisation des terres, et tout particulièrement la désertification et la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres : www.ipcc.ch/report/SRCCL . Il aborde les défis liés à la fois à l'adaptation et l'atténuation.

Le troisième rapport spécial SROCC (septembre 2019) porte sur l'océan et la cryosphère dans un climat qui change. Il est centré sur la manière dont le changement climatique affecte l'océan et la cryosphère, les écosystèmes et les sociétés humaines, dans les régions de haute montagne, les régions polaires, pour le littoral, ce qui est lié à l'océan, y compris via les événements extrêmes et abrupts. Les options d'atténuation ne font pas partie de cette évaluation, sauf le "carbone bleu" (le potentiel des puits de carbone liés aux écosystèmes marins côtiers). Ce rapport souligne les enjeux de l'action pour renforcer la résilience : www.ipcc.ch/report/SROCC .

Cette présentation fera donc le point sur les évolutions observées, leurs causes, sur les projections d'évolutions futures, en particulier en ce qui concerne leurs impacts et risques, en fonction des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre à venir.

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

par Céline GUIVARCH, ingénieur en chef des Ponts, Ecole des Ponts ParisTech et
Henri WAISMAN, Iddri

A quoi pourrait ressembler un monde qui atteint l'objectif collectif fixé dans l'Accord de Paris sur le climat de « contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5°C » ? Quel(s) chemin(s) pour y arriver ? Quels rôles pour les technologies et pour les changements de consommations ? Quelles transformations de nos systèmes énergétiques, d'usage des sols, alimentaires, de nos villes et de nos infrastructures ? Peut-on construire de telles transformations tout en satisfaisant d'autres objectifs de la société ayant trait aux dimensions sociales, économiques et environnementales ? Comment maximiser les synergies et limiter les risques de compromis entre ces différentes familles d'objectifs ? Quelles sont les conséquences pour l'action publique ? Quel est le rôle des différents acteurs (collectivités locales, secteur privé, individus...) ?

Autant de questions que nous aborderons en nous appuyant sur les analyses synthétisées dans le rapport spécial du GIEC sur « le réchauffement global à 1,5°C ». Nous ferons le point sur la façon dont ces différentes questions sont discutées dans les arènes internationales et les perspectives d'évolution en 2020, année cruciale pour la mise en œuvre de l'accord de Paris. Nous ferons également un point plus spécifique sur la situation de la France par rapport à ces scénarios et transitions, à l'objectif de neutralité carbone qu'elle se fixe, aux trajectoires d'émissions passées, et au chemin qu'il reste à parcourir, en nous appuyant notamment sur le premier rapport du Haut conseil pour le climat.

Anticiper l'évolution des territoires

par **Hervé LE TREUT**, climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace, Académie des sciences

Ne pas laisser la planète se réchauffer à un niveau de température qui dépasse de plus de 1,5 degrés, la valeur qui était celle de la période préindustrielle, est impératif si l'on s'en tient aux risques qui pèsent sur les territoires les plus vulnérables. Mais la possibilité d'y parvenir est considérablement plus restreinte qu'elle ne l'était il y a 30 ans, juste avant le sommet de la Terre de Rio, en 1992. Les émissions de CO₂ étaient alors de 5 à 6 milliards de tonnes de carbone par an –elles ont doublé depuis cette date. De fait, nous avons déjà considérablement engagé le futur, comme en témoignent des phénomènes tels que la fonte des glaciers et de la banquise, le réchauffement en profondeur des océans, ou l'évolution des écosystèmes. La situation est plus grave encore si l'on se réfère au futur proche : le réchauffement des quelques prochaines décennies est déjà fortement contraint par les émissions passées et le mélange rapide des gaz à effet de serre par la circulation atmosphérique en fait un problème mondial qui s'impose à tous.

Cette évolution pose un problème grandissant. Nous avons de moins en moins la possibilité de modifier significativement l'évolution climatique locale au travers de nos propres actions. Il est donc nécessaire de s'adapter préventivement à des évolutions qui relèvent à la fois de la part déjà irrémédiable des changements à venir et des retards ou échecs possibles des actions internationales. Les territoires ont dans ce cadre un rôle privilégié à jouer. C'est en effet à leur échelle que se développent les impacts majeurs des changements climatiques et que se font une grande part des émissions de gaz à effet de serre. C'est donc à ce niveau que devront s'élaborer des stratégies de co-bénéfice entre atténuation et adaptation au changement climatique. Et c'est donc aussi là que devront se définir des arbitrages entre différents usages des sols, différentes stratégies de protection de la biodiversité ou différentes gestions de zones vulnérables telles que les villes, les montagnes ou les littoraux.

Ceci impose aussi une connaissance approfondie et pluridisciplinaire de ces territoires, qui sont tous différents les uns des autres. L'exemple de la Nouvelle-Aquitaine, au sein de laquelle le projet Acclimaterra a mis en œuvre une série très large de visites régionales (<http://www.acclimaterra.fr>) montre qu'il est nécessaire de prendre la mesure des évolutions en cours, à la fois en écoutant l'expression des divers impératifs sociaux et en facilitant la prise de décisions de l'ensemble des acteurs régionaux par une « mise en récit » du diagnostic scientifique. Le projet Acclimaterra a aussi été matérialisé par la production de deux rapports qui ont rassemblés environ 400 scientifiques et ont été publiés sous la forme de livres soigneusement édités permettant d'atteindre le grand public. Ce travail a montré que les régions, en profitant du lien affectif qui les unit à leur population, peuvent ainsi constituer un lieu important d'innovation et de réflexion et apporter des éléments de solutions importants au problème climatique.

Changement climatique, risque et enjeux : le rôle des observations

par Anny CAZENAVE, géophysicienne, Observatoire Midi-Pyrénées, *International Space Science Institute*, Académie des sciences

Pour comprendre le fonctionnement complexe du système climatique et son évolution sous l'effet des forçages naturels et anthropiques, ainsi que les impacts du changement climatique sur les systèmes naturels et sociétés humaines, les grands organismes internationaux et les agences spatiales de nombreux pays ont recommandé ou mis en place, depuis environ trois décennies, une grande variété de systèmes d'observations des paramètres climatiques, aux échelles globale, régionales et locales. Le GCOS (*Global Climate Observing System*) a défini plusieurs dizaines de variables climatiques essentielles (*Essential Climate Variables/ECVs*) devant être observées de façon très précise sur le long terme, depuis l'espace ou le sol, pour mieux comprendre les processus en jeu et leurs interactions, et valider les modèles simulant les évolutions futures. Le rôle de l'observation spatiale est particulièrement important puisque les mesures sont globales et couvrent des régions difficiles d'accès comme les pôles et les déserts, ou encore les zones de conflits. Elle fournit une vision synoptique des phénomènes ; les mesures sont répétitives, homogènes et peuvent couvrir de longues périodes de temps. Si le satellite embarque différents capteurs (ou si l'on associe les données de plusieurs satellites en orbite), on peut observer simultanément différents paramètres fournissant une vision intégrée de l'état du système. Mais l'observation in situ est aussi incontournable, par exemple pour mesurer les paramètres physiques et chimiques à l'intérieur de l'océan. En Europe, le programme Copernicus de surveillance de la Terre et de l'environnement, opérationnel depuis 2014, fournit gratuitement, via des services adaptés, une vaste gamme de données climatiques et de produits élaborés, destinés non seulement à la communauté scientifique internationale mais aussi à des organismes publics et privés ainsi qu'aux décideurs politiques. Alors que la compréhension du fonctionnement du climat et son évolution future reste la motivation première des grands programmes internationaux de recherche sur le climat (ex., le '*World Climate Research Programme/WCRP*'), on note depuis peu une nette tendance à la quantification précise des impacts, en particulier sur les systèmes socio-économiques. C'est dans cette perspective que la France a mis en place récemment un grand programme international d'observation depuis l'espace des impacts du changement climatique, le '*Space Climate Observatory* ou Observatoire Spatial du Climat'. Son but est d'utiliser en synergie différents types de données environnementales, combinées à des données socio-économiques, pour mieux évaluer les conséquences locales/régionales de l'évolution du climat et proposer des solutions relatives à l'adaptation et l'atténuation. Dans cette présentation, nous discuterons les différents aspects mentionnés ci-dessus en s'appuyant sur des exemples concrets d'observations du système climatique, de ses changements et des impacts associés.

L'océan de l'anthropocène

par Jean-Pierre GATTUSO, océanographe, CNRS, Sorbonne-Université, Iddri

L'océan est une composante essentielle du système climatique. Il a emmagasiné 93 % de l'excès de chaleur lié à l'augmentation de l'effet de serre, au prix de son propre réchauffement et de la montée du niveau des mers, principalement par dilatation et fonte des calottes glaciaires. Il a également absorbé une portion importante (28 % depuis 1750) des émissions de gaz carbonique (CO₂) dues aux activités humaines au prix cette fois d'une augmentation de l'acidité de l'eau de mer.

Je présenterai les risques encourus par les organismes et les écosystèmes marins ainsi que pour les services qu'ils nous rendent. Deux scénarios seront pris en compte : la poursuite des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le rythme actuel ou leur diminution de manière à limiter la hausse de la température de la planète au-dessous 2 °C d'ici 2100, en adéquation avec l'Accord de Paris.

Si l'océan est un acteur et une victime des changements climatiques, il est aussi une source de solutions. Un large éventail de mesures fondées sur l'océan existe pour limiter le changement climatique et ses impacts sur les écosystèmes marins. Au-delà des opportunités offertes, chaque mesure présente des limites. Si plusieurs d'entre elles ont un potentiel important pour résoudre le problème à l'échelle globale, elles présentent trop d'incertitudes et/ou de risques d'effets collatéraux négatifs pour que l'on recommande leur déploiement à grande échelle. En revanche, la plupart des mesures locales apparaissent « sans regret », mais elles ne répondent pas au défi à l'échelle planétaire.

La pertinence de ces mesures a été évaluée grâce à plusieurs critères, notamment l'efficacité potentielle, la faisabilité, les co-bénéfices, les inconvénients, le rapport coût-efficacité et la gouvernabilité. La « solution » réside dans l'association de mesures globales et locales, certaines d'entre elles pouvant être déployées à grande échelle dès à présent.

Ma présentation fournira quatre messages-clés :

1. L'océan exerce une influence déterminante sur le système climatique et fournit aux humains des services essentiels.
2. Les écosystèmes marins et côtiers pâtissent déjà d'une dégradation largement observable qui ne manquera pas de s'aggraver, y compris avec une réduction des émissions mondiales de CO₂ compatible avec l'accord de Paris. Quoiqu'il arrive, les dommages infligés à l'océan se ressentiront sous toutes les latitudes, devenant un problème planétaire.
3. Une limitation immédiate et substantielle des émissions de GES, et notamment des rejets de CO₂, constitue une condition *sine qua non* pour éviter le dépassement de seuils d'impacts irréversibles.
4. L'océan est une source de solutions pour combattre le changement climatique et ses impacts mais plus la teneur en CO₂ atmosphérique augmentera, moins nous disposerons de moyens pour protéger et restaurer les écosystèmes dégradés.

Modèles et projections

par **Olivier BOUCHER**, climatologue, Institut Pierre-Simon Laplace

Cette présentation vise à présenter le 6^e projet d'intercomparaison des modèles de climat (CMIP6), ses objectifs et ses protocoles expérimentaux. Nous discuterons aussi les premiers résultats obtenus avec le nouveau modèle de climat de l'IPSL (IPSL-CM6A-LR), à la fois en ce qui concerne les climats passés (et en particulier la période dite "historique" de 1850 à nos jours), le climat présent, et les climats futurs selon une gamme de scénarios.

Grâce à un grand ensemble de simulations de la période historique (plus de 30 membres qui ne diffèrent que par leurs conditions initiales), nous montrerons les parts relatives des perturbations anthropiques et de la variabilité naturelle du climat sur le réchauffement climatique simulé par le modèle. Des expériences factorielles sur la période historique ont également été réalisées afin de déconvoluer les effets des différentes perturbations, naturelles et anthropiques. Il reste difficile de quantifier précisément les changements climatiques en cours à l'échelle régionale à l'aide de modèles globaux, néanmoins des signaux clairs émergent sur certaines caractéristiques du climat et nous présenterons quelques résultats sur les vagues de chaleur en France. D'autres simulations plus idéalisées permettent quant à elles de mieux comprendre le rôle des rétroactions climatiques et comment elles dépendent de l'amplitude du réchauffement. Ces résultats préliminaires devront être remis dans le contexte plus large de CMIP6 pour quantifier les incertitudes des projections climatiques et leurs implications en termes de politiques d'adaptation et d'atténuation.

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

par Venkatramani BALAJI, géophysicien, *Princeton University*, Institut Pierre-Simon Laplace

Depuis son origine à l'aube de l'informatique moderne, la modélisation du « Système Terre » (atmosphère, océan, glaces et surfaces continentales) a toujours utilisé au maximum les possibilités technologiques de ce domaine. Ceci a permis des progrès rapides et importants de la prévision météorologique et de l'utilisation de modèles en vue de réaliser des projections de l'évolution de notre climat et a permis de mieux appréhender le fonctionnement du « Système Terre » dans son ensemble. Ces progrès ont contribué à une meilleure connaissance des aspects scientifiques du changement climatique et à la mise en œuvre de politiques en aval.

Dans cette présentation, nous examinerons différents aspects associés à la technologie sous-jacente à ces progrès importants réalisés en modélisation. Ainsi, nous évoquerons les limites physiques de la miniaturisation et l'émergence d'une hiérarchie dans l'utilisation des mémoires qui rendent assez risquée la poursuite d'une approche classique de la simulation et de l'analyse de l'évolution du climat. Nous examinerons les tendances de la modélisation du climat et plus largement du « Système Terre » au niveau de l'évolution des expériences coordonnées à l'échelle mondiale (CMIP-IPCC) et de l'émergence d'une continuité entre prévision météorologique et projections climatiques. Ceci nous amènera à évoquer de nouvelles directions de recherche au niveau de la programmation des modèles et de l'utilisation des données. Ces deux volets sont indissociables et nous en proposerons une approche unifiée.

Evènements extrêmes

par Sonia SENEVIRATNE, climatologue, ETH Zurich

Cette présentation résumera l'état de la science sur les changements des événements météorologiques et climatiques extrêmes et leur lien avec les émissions anthropiques de CO₂. En particulier, je présenterai les conclusions du rapport du GIEC sur le réchauffement global à 1.5°C et 2°C (<https://www.ipcc.ch/sr15/>) et les conséquences associées pour les événements extrêmes et les impacts sur les écosystèmes et la société.

Avec maintenant déjà 1°C de réchauffement global, nous commençons à voir des événements sans précédent, tels que des canicules particulièrement sévères et des événements extrêmes simultanés en différents endroits du globe. Nous pouvons aussi mieux isoler la contribution des émissions humaines de gaz à effet de serre dans l'augmentation du risque d'événements de ce type. Un réchauffement à 1.5°C permettrait d'éviter une augmentation supplémentaire des événements extrêmes par rapport à un climat à 2°C, mais impliquerait néanmoins une hausse substantielle des risques pour les écosystèmes et la société par rapport à aujourd'hui. Par ailleurs, certains événements extrêmes pourraient induire une augmentation supplémentaire du réchauffement global, en particulier les sécheresses qui pourraient perturber l'assimilation du CO₂ atmosphérique par la végétation (Humphrey *et al.* 2018, Green *et al.* 2019). Les modèles climatiques sous-estiment une partie de ces rétroactions ce qui devrait induire un surcroît de prudence dans la planification des actions nécessaires pour atteindre un budget neutre de CO₂ et stabiliser la hausse actuelle de la température globale.

Références:

Humphrey, V., J. Zscheischler, P. Ciais, L. Gudmundsson, S. Sitch, S.I. Seneviratne, 2018: Sensitivity of atmospheric CO₂ growth rate to observed changes in terrestrial water storage. *Nature*, 560, 628-631

Green, J.K., S. I. Seneviratne, A. M. Berg, K. L. Findell, S. Hagemann, D. M. Lawrence, P. Gentile, 2019: Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, 565, 476-479

Changement climatique et biosphère

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

Les causes principales de dégradation de la biosphère en termes de richesse et d'abondance d'espèces mais aussi de fonctionnement des écosystèmes étaient jusqu'ici surtout imputables à la surexploitation et la pollution des milieux par l'homme. Cependant, les craintes que le changement climatique en devienne la cause principale d'ici le siècle prochain augmentent dans la communauté scientifique. Documenter et prévoir l'impact qu'aura le changement climatique sur la biosphère fait appel à de très nombreuses disciplines scientifiques qui doivent impérativement travailler ensemble pour comprendre comment le vivant, l'homme y compris, interagit avec les facteurs physiques de son environnement.

Les impacts des activités humaines sur la biosphère sont multiples, et il est difficile de faire la part de chacune, même dans les régions où l'homme est peu présent localement, tant son empreinte est maintenant globale. Nous pouvons cependant affirmer que le changement climatique qui a eu lieu au cours du dernier siècle a déjà profondément affecté la biosphère. Parmi les effets les plus importants touchant l'ensemble du monde vivant, nous pouvons citer un changement des rythmes biologiques chez une très grande majorité d'espèces (notamment avancement du « printemps biologique »), un changement des aires de répartition des espèces (déplacement vers les sommets et les pôles), des extinctions locales d'espèces dans les marges chaudes de leur répartition, des changements dans le fonctionnement des écosystèmes (par exemple productivité, recyclage des nutriments, séquestration du carbone). Les conséquences de ces changements sont multiples et majeures, notamment dérèglement des chaînes trophiques, modification des cycles biogéochimiques et altération des services écosystémiques.

Les projections que nous sommes capables de fournir de l'évolution future de la biosphère montrent une amplification des phénomènes observés depuis cinquante ans, notamment après 2050, du fait d'une augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes qui ne permettent plus aux espèces et écosystèmes les plus vulnérables de pouvoir récupérer. Les tous premiers signes de ces évolutions annoncées apparaissent aujourd'hui. Les milieux les plus vulnérables sont pour le moment surtout les milieux de hautes altitudes et hautes latitudes du fait de la présence de nombreuses espèces endémiques et spécialisées. En effet, celles-ci ne trouveront plus de conditions climatiques favorables à leur existence et n'auront pas le temps de s'adapter génétiquement du fait d'un manque de variabilité génétique et de temps de génération trop longs face à la vélocité du changement climatique. En effet, les moyens d'ajustement du vivant au changement climatique sont essentiellement de trois ordres : la migration qui permet de suivre le déplacement du climat, la plasticité phénotypique préexistante qui permet aux organismes de maintenir des performances similaires dans des conditions différentes, l'évolution génétique qui permet sous l'effet de la sélection naturelle de sélectionner des génotypes mieux adaptés à de nouvelles conditions. Ces différents moyens d'ajustement ont toutefois des limites auxquelles se heurtent les espèces. C'est pour ces raisons que les quelques moyens d'intervention à notre disposition, en sus de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, tels que la migration assistée d'espèces, ou la réduction des autres pressions anthropiques, doivent être étudiés et mis en œuvre.

Energie et climat : des défis communs dans le passé comme dans l'avenir

par **Didier ROUX**, physico-chimiste, Unitec, Fondation *La Main à la Pâte*, Académie des technologies, Académie des sciences

L'énergie qui est la source du travail mécanique, de la chaleur et de bien d'autres bénéfices a été le vecteur du développement technique et économique de nos sociétés. L'accès, depuis un peu plus de 150 ans, à des sources de matériaux fossiles (charbon, pétrole et gaz) peu chers, faciles à transporter et à utiliser, disponibles en grandes quantités, a longtemps été vu comme une chance pour l'humanité. Pourtant, aujourd'hui, cette vision optimiste change. L'épuisement inévitable, à terme, des énergies fossiles et l'augmentation importante de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui résulte de leur consommation, oblige nos sociétés à envisager une transition vers des sources d'énergie limitées en émission de CO₂ et ayant une origine compatible avec les évolutions de la population mondiale et de son niveau de vie.

La solution résulte, à la fois dans une plus grande sobriété, dans l'usage des énergies et dans des sources de moins en moins d'origine fossile. Même si bien des discours oscillent entre un excès de pessimisme et un excès d'optimisme, on peut déplorer qu'un grand nombre de réflexions sur ce sujet ne tiennent pas suffisamment compte des réalités scientifiques, technologiques et économiques. On se retrouve ainsi avec des solutions proposées qui sont soit totalement irréalistes, soit accessibles dans une échelle de temps bien plus longue que celle envisagée.

Il est donc indispensable de rappeler certains faits incontournables afin de ne pas laisser nos sociétés débattre sur des bases non réalistes.

Nous pouvons citer parmi les sujets à aborder :

- L'électricité ne représente en France que 25% de nos consommations énergétiques finales et est en grande partie décarbonée (> 80%). C'est pourtant le sujet qui tient la plus grande place dans les débats alors que sa contribution sur le Climat est négligeable.
- Le passage à des transports tout électrique est aujourd'hui très loin d'être envisageable rapidement à grande échelle. Il n'a de sens au niveau mondial que si la production électrique est largement décarbonée et que des évolutions sur les réseaux de distribution et le stockage de l'électricité sont mis en place massivement.
- Les économies d'énergie les plus grandes peuvent être faites en rénovant thermiquement les bâtiments anciens. Même si des objectifs ambitieux sont régulièrement annoncés, les réalisations sont largement inférieures aux prévisions.
- La récupération de la chaleur et les réseaux de chaleur sont des sources importantes d'économie encore sous-utilisés.
- De nombreuses initiatives locales au niveau des institutions territoriales sont intéressantes et démontrent une prise de conscience réelle mais comparativement l'Etat ne fixe pas suffisamment le cadre national et international opérationnel dans lequel se placer.

L'Académie des sciences détaille tous ces points dans un cahier d'acteur relatif au débat public sur la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie :

<https://ppe.debatpublic.fr/cahier-dacteur-ndeg82-academie-sciences> .

Conditions économiques et sociales du déclenchement de la transition bas carbone

par **Jean-Charles HOURCADE**, économiste, Ecole des hautes études en sciences sociales, Ecole des Ponts ParisTech

Nous baliserons ici l'espace des possibles pour un tel déclenchement de la transition, en partant du principe que celui-ci sera rejeté par des fractions importantes de la population s'il aggrave leurs inquiétudes et dégrade leurs conditions de vie.

Cet espace sera d'abord cerné à trois niveaux :

- les types de coûts impliqués dans la transition : liens entre les coûts des options techniques bas carbone, les montants d'investissements nécessaires, la dévalorisation des actifs « carbonés » existants, les retombées sur la croissance, l'emploi et les pouvoirs d'achat ;
- les impacts distributifs de la hausse des prix de production entraînée par la propagation dans l'appareil productif du surcoût des techniques bas carbone et par la dévalorisation de certaines classes d'actifs ;
- les dispositifs disponibles pour maîtriser les conséquences négatives de l'enclenchement de la transition : maîtrise des coûts techniques et de leur propagation via des réformes fiscales, transferts compensatoires, baisse du coefficient-risque des investissements, formation de nouvelles classes d'actifs.

Dans un deuxième temps, nous décrirons comment les politiques climatiques peuvent aider à réduire les « lignes de faille » d'une économie mondiale dont nous craignons l'entrée dans une période de récession sinon de « stagnation séculaire » : stratégies de développement trop *export oriented*, épargne surabondante mais faible « propension à investir » en raison de la priorité à la « valeur actionnariale », placements immobiliers, fonciers et spéculatifs au détriment des investissements en infrastructures, limites de la capacité des banques centrales à soutenir l'activité via les taux d'intérêt, actions publiques limitées par l'endettement des Etats.

Nous donnerons alors les mécanismes par lesquels une vague d'investissement bas carbone peut aider à réduire ces tensions a) recentrage des économies sur les marchés intérieurs d'infrastructures b) dispositifs permettant de réorienter l'épargne privée vers les investissements bas carbone, la domestication de ce que Keynes appelait « les esprits animaux de la finance » étant une des conditions pour défaire nœud gordien climat/développement.

Dans un troisième temps nous aborderons l'économie politique du déclenchement de la transition bas carbone en insistant sur les conditions d'une coordination internationale . Nous centrerons l'attention sur deux verrous politiques : les 100 milliards de dollars par an que le « Nord » s'est engagé à fournir au pays « Sud » pour sa transition bas carbone et l'émergence d'une classe d'actifs capables de convaincre les pays producteurs de pétrole ou les pays richement dotés en charbon de réinvestir dans le bas carbone les rentes des énergies fossiles, et de donner une traduction pratique à l'idée de forêt tropicale comme bien public.

Décarboner le transport : véhicules électriques ou à hydrogène, transport aérien, transport maritime

par **Nicolas MEILHAN**, ingénieur, France Stratégie

Dans notre pays, le transport est le premier secteur contribuant aux émissions de gaz à effet de serre et c'est aussi un contributeur très important aux niveaux européen et mondial en particulier une fois prises en compte les émissions liées au transport aérien et maritime. Après avoir dressé un tableau de ces émissions à ces différents niveaux, nous centrerons notre exposé sur le transport automobile.

Le succès des SUVs combiné au désamour grandissant pour le diesel a fait repartir à la hausse les émissions de CO₂ des voitures neuves depuis deux ans : avec plus de 120 grammes de CO₂ par km, elles dépassent aujourd'hui le seuil maximum fixé par la Commission européenne pour l'année 2021. L'objectif de 95 grammes par km pour 95 % de voitures vendues l'an prochain, semble désormais hors de portée. Si la nécessité d'électrifier le parc automobile ne fait plus de doute aujourd'hui, le gain environnemental d'une telle conversion dépend de la taille (du poids) des voitures : quelle soit électrique ou thermique, une voiture consomme d'autant plus d'énergie qu'elle est lourde.

Aller vers des voitures plus légères est donc un préalable nécessaire. Mais comment y parvenir d'autant plus qu'en avril 2019, l'Union européenne a adopté l'objectif d'une baisse supplémentaire de 37,5 % à horizon 2030. Or ces émissions carbone, loin de baisser, viennent de connaître deux années de hausse consécutives. Voilà les constructeurs automobiles au pied du mur. Ils vont devoir accomplir trois ans d'affilée une performance jamais réalisée au cours des vingt dernières années : abaisser les émissions moyennes de CO₂ des ventes de voitures neuves de 10 grammes par an. Et à l'horizon 2030, il leur faudra encore diviser par deux les émissions par rapport à 2018. Est-ce possible ? Par quelles mesures les pouvoirs publics peuvent-ils accompagner cet effort ? L'utilisation de l'hydrogène dans le transport routier offre-t-elle des opportunités ?

Les constructeurs ont déjà beaucoup travaillé ces dix dernières années sur l'amélioration des rendements des moteurs thermiques, sur l'aérodynamisme et l'allègement des voitures. Les deux leviers les plus prometteurs sont aujourd'hui la réduction de la taille des voitures et leur électrification.

Pour atteindre ces objectifs, un bonus-malus indexé sur le poids et sur l'utilisation en mode électrique des voitures pourrait être mis en place au niveau européen. L'instauration d'une norme limitant l'empreinte carbone associée à la production de ces voitures permettrait aussi de s'assurer que les voitures à faibles émissions et leurs batteries soient fabriquées avec une électricité peu carbonée. Nous l'avons compris : pour l'Union européenne, l'enjeu n'est pas seulement environnemental mais aussi économique et social.

Captage et stockage du CO₂

par Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL, ingénieure géologue, service géologique national (BRGM), CO₂GeoNet

La neutralité carbone en 2050 ne sera atteignable que si nous mobilisons tous les moyens possibles. Remettre le carbone dans le sous-sol d'où il a été extrait est un moyen efficace pour réduire les émissions résiduelles incompressibles de CO₂ et même pour retirer du CO₂ de l'atmosphère, comme le souligne le GIEC. C'est le puits de carbone géologique, complémentaire aux puits de carbone terrestre (sols et forêts) et océanique.

Les recherches sur le captage et le stockage géologique de CO₂ (CSC, ou CCS en anglais) ont démarré dans le monde dans les années 1990 avec l'idée de renvoyer dans le sous-sol sous forme de CO₂ le carbone que l'on y extrait sous forme de charbon, de pétrole ou de gaz naturel, l'exploitation de ces énergies fossiles étant la principale cause du réchauffement climatique. Boucle vertueuse qui devrait permettre de ne plus perturber le compartiment atmosphère de la Terre et qui s'appuie notamment sur l'existence de nombreux gisements naturels de CO₂, véritables analogues naturels montrant qu'au-delà d'un km de profondeur, les couches géologiques peuvent piéger durablement de très grandes quantités de CO₂.

La technologie CSC peut jouer un rôle clé pour réduire les émissions de CO₂ de nombreuses industries (sidérurgie, cimenteries, incinérateurs de déchets, centrales à biomasse/gaz/charbon, production de gaz naturel et d'hydrogène...). Elle peut aussi être combinée à des énergies renouvelables pour retirer du carbone de l'atmosphère (couplage à la biomasse-énergie – BECSC, ou BECCS en anglais), produire de la chaleur (couplage avec la géothermie) ou des hydrocarbures synthétiques (combinaison CO₂ et H₂ vert produit par électrolyse de l'eau).

A noter que depuis quelques années, des efforts sont entrepris pour trouver des voies de valorisation du CO₂, en l'utilisant comme matière première pour fabriquer de nouveaux produits. Cela pourrait permettre de catalyser le développement des technologies de captage de CO₂ et du CSC, mais le stockage reste indispensable pour réduire les émissions de CO₂ à un niveau compatible à ce qui est requis pour la lutte contre le changement climatique.

Il y a actuellement dans le monde 19 opérations commerciales de CSC en fonctionnement (dont 2 seulement en Europe, en Norvège). Cela représente 40 Mt de CO₂ captées par an et plus de 230 Mt de CO₂ déjà injectées dans le sous-sol en toute sécurité. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, au moins 94000 Mt de CO₂ nécessitent d'être captées et stockées d'ici 2050 pour tenir les engagements climatiques de l'accord de Paris. Ce qui nécessite un saut d'échelle considérable !

C'est pourquoi des efforts accrus de recherche et d'innovation sur cette technologie sont demandés au niveau international par la « Mission Innovation » sur les énergies propres lancée à la COP21, au niveau européen par le plan stratégique pour les technologies énergétiques (SET-Plan), en France dans le projet de révision de la Stratégie Nationale Bas-Carbone.

Bâtiments et urbanisme

par Vincent VIGUIÉ, ingénieur des Ponts eaux et forêts, Ecole des Ponts ParisTech

La majeure partie de la population mondiale vit aujourd'hui en ville, et l'urbanisation se poursuit à un rythme sans précédent dans l'histoire. Nous estimons ainsi qu'il y a en moyenne dans le monde chaque jour 200 000 citadins de plus. Cela correspond à l'équivalent d'une ville comme Lyon à construire chaque semaine, ou encore à l'équivalent de l'ensemble de l'agglomération parisienne tous les deux mois. Or, la manière dont les villes sont construites joue un rôle déterminant sur de nombreuses problématiques environnementales, et notamment leur niveau d'émissions de gaz à effet de serre. Nous constatons ainsi que les émissions par personne peuvent être très différentes d'une ville à l'autre, et ce même pour des villes de populations et de niveaux de revenu par habitant comparables, mais avec des infrastructures et des organisations spatiales différentes.

La manière dont sont conçus les bâtiments, tout d'abord, influe fortement sur les consommations d'énergie liées au chauffage, à la climatisation et à l'eau chaude. Si de nombreux leviers existent et sont assez largement mis en œuvre afin de construire des bâtiments à haute performance environnementale, plusieurs questions restent en suspens. Premier exemple : si des politiques peuvent influencer sur les bâtiments qui seront construits à l'avenir, il est beaucoup plus difficile de réussir à agir sur le parc de bâtiment déjà existant. Autre exemple : vu que les caractéristiques des bâtiments doivent être adaptées au climat local pour réduire leur empreinte environnementale, il est particulièrement difficile de concevoir des bâtiments adaptés au climat actuel, mais aussi au climat futur. Réussir à éviter que le changement climatique n'entraîne lui-même une augmentation des consommations d'énergie du fait d'un usage massif de la climatisation, par exemple, est un challenge qui n'est pas trivial à résoudre.

Au-delà des bâtiments eux-mêmes, leur répartition dans l'espace, c'est-à-dire l'organisation spatiale des villes, joue également un grand rôle. Les villes sont, en moyenne dans le monde, tendanciellement de moins en moins denses, ce qui accroît les distances à parcourir tous les jours par les habitants, et rend plus difficile le développement de transports alternatifs à la voiture, aujourd'hui et dans les années à venir. Cet étalement urbain entraîne aussi des impacts sur un certain nombre d'autres problématiques environnementales, telles que l'artificialisation des sols. Comprendre comment agir contre cet étalement urbain, et quels sont les enjeux associés, est une branche active de la recherche actuelle sur le sujet.

Dans cette présentation, nous discuterons les différents aspects mentionnés ci-dessus en s'appuyant sur des résultats récents et exemples concrets de villes utilisées comme cas d'étude.

Utilisation des terres et changement climatique : agriculture, alimentation, énergie

par **Jean-François SOUSSANA**, ingénieur agronome, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)

Les terres sont soumises à des défis interdépendants, notamment le changement climatique, la dégradation des sols et la désertification, l'insécurité alimentaire, l'épuisement des nappes phréatiques, la pollution de l'eau, la perte de biodiversité et la dégradation des services écosystémiques. Identifier et déployer des options d'intervention offrant des avantages communs pour tous les défis du secteur des terres constitue un enjeu majeur pour ce siècle. Le récent rapport spécial¹ du GIEC sur le changement climatique et les terres (2019) montre que la séquestration du carbone dans les sols est la seule option apportant des co-bénéfices à l'ensemble des défis sur près de 58% des surfaces continentales libres de glace. En revanche, des effets négatifs et des antagonismes pour certains défis locaux limitent le déploiement potentiel d'autres options comme la bioénergie avec (ou sans) capture et stockage du carbone (BECCS) à moins de 9% des terres libres de glace. Entre pays, plus le nombre de défis liés à la terre est grand, plus faible est le nombre d'options de réponses ayant uniquement des co-bénéfices locaux et moindre est la capacité de mise en œuvre de ces réponses, si l'on tente de l'approcher par l'indice de développement humain (HDI²). D'ici 2050, des scénarios n'ayant que des avantages conjoints pour tous les défis du secteur des terres délimitent un espace viable qui pourrait permettre d'atteindre 6 ODD (Objectifs de Développement Durable) y compris la lutte contre la faim et la stabilisation du climat à 1,5°C, pour des niveaux de population mondiale atteignant 8,5 ou 9,2 milliards. Cependant, aucune solution viable limitant le réchauffement climatique à 1,5°C n'a été trouvée dans un scénario de population mondiale élevée (10 milliards en 2050) qui requiert une expansion des terres agricoles. Tous les scénarios viables pour l'ensemble des défis incluent la lutte contre la déforestation, la restauration et la gestion améliorée des forêts et des tourbières, l'augmentation des rendements agricoles et de l'efficacité de conversion alimentaire des troupeaux, le déploiement à grande échelle de la séquestration du carbone dans les sols et la réduction rapide des émissions agricoles de méthane et de protoxyde d'azote, ainsi que l'utilisation à petite échelle (moins d'un million de km²) de BECCS. En outre, une réduction du gaspillage alimentaire et, dans la plupart des cas, une consommation réduite de produits de l'élevage sont nécessaires. Nos conclusions soulignent le besoin urgent d'une action coordonnée à grande échelle afin de créer des conditions favorables à l'adoption de réponses à l'ensemble des défis du secteur des terres et à l'amélioration de l'efficacité de la gouvernance en matière de gestion des terres et d'alimentation.

Références:

¹ : IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems

² : UNDP, Human development indices and indicators: 2018 statistical update

Les énergies renouvelables : production, ressources, intermittence, coûts, durabilité

par **Philippe MALBRANCHE**, ingénieur, Institut National de l'Énergie Solaire

Quelles options s'offrent à nous pour éliminer totalement les énergies fossiles d'ici trente ans ? Il n'y a aujourd'hui que la fission nucléaire et les énergies renouvelables, qui, couplées aux économies d'énergie, permettraient de changer radicalement le niveau des émissions, sous réserve d'un déploiement extrêmement rapide.

Cette présentation se focalise sur les avancées des énergies renouvelables en termes de performances techniques, économiques et sociétales. Après quatre décennies de progrès ininterrompus, le solaire et l'éolien notamment sont arrivés à offrir des prix de revient inférieurs à ceux de toute autre filière technologique dans de nombreux pays. S'en servir comme base des mix énergétiques futurs permettra de proposer les services les plus économiques pour les usagers, d'autant que cette baisse évidemment continue.

A ce jour, 53 pays prévoient de basculer d'ici 2050 vers un approvisionnement 100% renouvelable, sans même parler des entreprises, des villes et des régions. Quelques exemples de mix validés par des simulations annuelles au pas horaire seront présentés, aux échelles régionale, nationale et internationale. Ceci permettra d'aborder les aspects les plus controversés de ces énergies, comme : l'intermittence, prévisible et gérable en jouant sur les complémentarités, la vision systémique et le numérique ; la fiabilité des réseaux, renforcée ; l'espace nécessaire, minimal ; la durabilité, potentiellement excellente. En bref, la plupart des points mis en avant pour justifier l'inaction et éviter ces scénarios, qualifiés « d'utopiques ».

L'arrivée de ces énergies à coût marginal quasi-nul induit une révolution dont les impacts techniques, socio-économiques, financiers, via les nombreuses dévalorisation d'actifs, et géopolitiques, sont encore largement sous-estimés. Avec maintenant des prix d'électricité inférieurs à 30€/MWh, ce qui est déjà le cas dans la plupart des pays ensoleillés et sera le cas sous moins de dix ans en France, l'hydrogène issu d'électrolyse va enfin devenir propre et compétitif. Bien au-delà des usages actuels dans les réseaux électriques, cette révolution énergétique par les renouvelables permettra la décarbonation des transports, notamment via la mobilité solaire déployable dès maintenant, et celle de nombreux procédés industriels : chaleur, raffineries, industries métallurgiques et chimiques, production de biogaz ou de biocarburants.

Comment accélérer ce changement ? Avec des objectifs ambitieux, des réglementations appropriées et en mobilisant tout le monde, particuliers comme professionnels, associations et décideurs, dès maintenant, autour de ce projet. Tout le monde peut en devenir investisseur à son niveau, directement ou indirectement. Le solaire notamment permet à chacun d'agir, et souvent sur un pied d'égalité, pour améliorer son pouvoir d'achat.

Les énergies renouvelables nous offrent l'opportunité de solutions innovantes, variées et déployables rapidement, qui se traduisent par de très faibles émissions et un moindre coût, sans compter leurs autres avantages comme l'emploi, la balance commerciale ou l'absence de problèmes de déchets ou de recyclage. Profitons-en pour agir, en diffusant massivement ces solutions cohésives, et de surcroît, en faisant plaisir.

Energie nucléaire : atouts et faiblesses, nécessité d'une approche intégrée

par Yves BRÉCHET, physicien, *Monash University, McMaster University, Saint Gobain, Académie des sciences*

L'énergie nucléaire de fission est une source d'électricité décarbonée qui fait un usage particulièrement économe de la matière et de l'espace, et qui a fait de la France le « bon élève » de la lutte contre les gaz à effet de serre. Elle est largement déployée dans notre pays ce qui est un atout quand on se pose la question de la trajectoire à construire et non simplement celle de l'objectif à atteindre. En tant que telle, elle a toute sa place dans les stratégies énergétiques à mettre en œuvre face au réchauffement climatique.

Mais l'analyse de ses atouts et de ses faiblesses demande une approche intégrant la question des ressources en uranium, la question de la sûreté et celle du vieillissement des équipements, les problèmes associés au démantèlement des centrales en fin de vie et enfin la gestion des déchets produits par cette source d'énergie.

Aucun de ces aspects ne peut être abordé indépendamment des autres et aucune de ces questions ne peut faire l'économie d'une réflexion sur les échelles de temps impliquées.

Enfin, la question de la coexistence de l'énergie nucléaire et des autres sources d'électricité impose une réflexion sur la nature des réseaux, les capacités de stockage et la flexibilité du mix énergétique.

La question du coût du nucléaire ne peut être posée que dans le cadre de cette approche globale.

Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?

par Jean-Marie TARASCON, chimiste, Collège de France, Académie des sciences

La situation énergétique actuelle, son évolution et ses conséquences pour la planète seront tout d'abord décrites ainsi que les perspectives liées aux énergies renouvelables avec une mention toute particulière pour leur stockage voire leur distribution ; l'objectif final étant de réduire notre empreinte CO₂. L'application des batteries pour l'intégration des énergies renouvelables ainsi que pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les transports sera également commentée. Par la suite, les dernières avancées, fortement tributaires de la chimie, dans le domaine du stockage électrochimique, et notamment, des batteries à ions lithium, sodium, voire tout solide seront présentées. Ces recherches, qui font appel à de nouveaux concepts, de nouvelles compositions chimiques d'électrodes ainsi que de nouveaux matériaux à faibles empreintes écologiques, seront décrites. Une vision des recherches futures dans ce domaine et de leur intégration au niveau européen clôturera cet exposé.

Références:

1. Grey, C. P.; Tarascon, J. M. *Sustainability and in situ Monitoring in Battery Development*. *Nat. Mater.* 2016, 16, 45–56.
2. Larcher D, Tarascon J. M, "Towards Greener and More Sustainable Batteries for electrical energy storage" *Nature chemistry*, November 17th, 2014.
3. Dunn B, Kamath H, Tarascon J-M. "Electrical energy storage for the grid: A battery of choices", *Science*, 18, 928-935, 2011.
4. Tarascon J-M. "Is lithium the new gold?" *Nature Chemistry*, 2, 510-510, 2010.

Changement climatique et éducation

par Pierre LÉNA, astrophysicien, *Office for Climate Education*, Académie des sciences

La transition climatique et écologique appelle, partout dans le monde, à de profondes transformations de comportements et de représentations, tant individuelles que collectives. Nées d'une mobilisation de la recherche scientifique, les stratégies d'atténuation et d'adaptation concernent à l'évidence le politique, l'économique, le financier mais également l'éducation. L'Accord de Paris, dans son article 12, reconnaît cette nécessité et fait aux signataires une obligation d'action. En 2017, dans une déclaration formulée par l'*InterAcademy Partnership for Science* au nom des académies des sciences du monde, les détails d'une telle action étaient analysés. Cette déclaration soulignait particulièrement le rôle décisif que peut jouer la communauté scientifique dans une mise en place qui ne soit pas l'expression de choix militants mais celle de faits scientifiques solides.

Nous analyserons comment les systèmes éducatifs dans le monde réagissent à ce nouvel objectif. Il inclut l'enseignement scientifique traditionnel, mais le dépasse par les dimensions de sciences sociales et humaines qu'il comprend nécessairement, ainsi que par ses aspects éthiques de solidarité. Nous examinerons comment les professeurs et les programmes scolaires y préparent, ainsi que les évolutions indispensables. Nous examinerons tout particulièrement le cas de la France, avec les priorités toutes récentes affirmées pour l'école primaire, le collège et le lycée, comprenant par exemple la mise en place d'un enseignement scientifique de tronc commun dans le lycée général. Nous observerons les initiatives nouvelles mises en place au niveau universitaire, de façon entièrement pluridisciplinaire, notamment en Californie, afin d'accompagner au mieux les étudiants et la jeunesse dans l'intérêt qu'ils portent aux questions d'environnement et de climat.

Le rôle de l'éducation est ici de fournir des références solides, des structures de pensée capable d'un dialogue, complétant une sensibilité fondée sur la générosité mais parfois limitée à l'émotion immédiate. Son rôle est également de proposer à la jeunesse des objectifs positifs - la construction d'une société décarbonée, des actions de science participative par exemple -, afin d'équilibrer les perspectives parfois angoissantes du climat futur. Si la conférence met surtout l'accent sur le climat, la problématique de biodiversité ne peut être ignorée dans ses aspects éducatifs.

Tant en France que dans le reste du monde, la préparation des professeurs est un élément essentiel de stratégie qui appelle à organiser l'accompagnement et la production de ressources pédagogiques adéquates. Différentes initiatives en France (*La main à la pâte* et l'*Office for Climate Education*), nées de la communauté scientifique, seront évoquées, ainsi que la place donnée aux questions éducatives lors de la COP25 en Espagne.

Enfin, les perspectives éducatives liées au climat ne sauraient ignorer la formation professionnelle, largement considéré par le Plan national d'adaptation au changement climatique de la France (PNACC).

Le changement climatique, une chance pour l'humanité ?

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

Aucun Etat ne peut désormais relever à lui seul les défis globaux, du terrorisme au désastre humanitaire des migrations, des crises financières et sociales aux risques sanitaires et écologiques. Le changement climatique n'est qu'un exemple parmi d'autres, mais il pourrait être une chance pour l'humanité s'il provoquait le sursaut nécessaire en ces temps de repli sur l'Etat nation, nous faisant prendre conscience de notre communauté de destin. Même à supposer un accord scientifique sur les faits et leur interprétation, la conscience de cette communauté mondiale impliquerait encore un triple effort pour adapter les réponses.

1. Bricoler un état de droit, sans Etat mondial

Les liens de causalité entre le fait générateur et le dommage, multiples et en interaction, rendent incertaine l'imputation des responsabilités. De même en ce qui concerne le choix des mesures à prendre face au risque d'irréversibilité du dommage : la punition arrive trop tard et la réparation est imparfaite. Il faut donc tenter d'anticiper le dommage en combinant, comme l'accord de Paris sur le climat le suggère, des objectifs communs destinés à être régulièrement actualisés et des responsabilités différenciées selon le contexte national, lui-même évolutif. Nous mesurerons l'ampleur du changement pour une pensée juridique qui, ne pouvant plus identifier le droit à l'Etat, tente de bricoler un état de droit, sans Etat mondial, « entre le national et l'international », peut-être même en dépassant cette distinction.

2. Recomposer pouvoirs et contre-pouvoirs

A l'échelle mondiale, le pouvoir législatif et le pouvoir exécutif restent aux mains des Etats, alors que la montée en puissance des juges semble déjà placer le pouvoir judiciaire au niveau mondial, qu'il s'agisse de juridictions internationales ou nationales, dès lors que celles-ci se comportent en juges mondiaux. En revanche, les contre-pouvoirs semblent venir des acteurs non étatiques. Dans l'idéal, le « savoir », qui associe les connaissances scientifiques des savants et l'expérience vécue des populations, éclairerait le « vouloir » des citoyens du monde que sont les ONG et autres acteurs civiques ; tandis que cette alliance entre savoirs et vouloirs encadrerait les pouvoirs, politiques et économiques.

3. Renouveler les représentations anthropologiques

Au récit-promesse d'une humanité émancipée (des Lumières à la Déclaration universelle des droits de l'homme), le changement climatique substitue le récit-catastrophe de l'effondrement de la planète, appelant la solidarité d'une humanité interdépendante, simple composante de la nature dont elle se croyait propriétaire. Une solidarité au demeurant peu compatible avec l'objectif de croissance d'une humanité en développement, celle du récit-programme de la main invisible du marché, revisité par la Chine et ses nouvelles routes de la soie. A moins que le rêve post humaniste d'une humanité augmentée nous fasse sortir de l'état d'humanité...



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Télécharger le programme complet :
<https://bit.ly/30efHIN>



Participez au débat en direct en proposant vos questions à
climatacad2020@academie-sciences.fr

Réseau wifi: 3Mazarine
Mot de passe: mazarine2019