

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

202

Novembre 2015

TOUT
S'EXPLIQUE

Supplément détachable
sur l'économie
circulaire



PARIS2015

LA RECHERCHE
SE MOBILISE
POUR LE CLIMAT

02

L'INTERVIEW

◆ Frédéric Journès présente
la stratégie internationale du CEA
dans le domaine des énergies ◆

04

ACTUALITÉ

◆ Le CEA fête ses 70 ans ◆
Une chercheuse du CEA à la tête
du groupe scientifique du Giec ◆
La French Tech nucléaire et
renouvelable au Japon ◆ Le HPC
accélère la transition vers les énergies
bas carbone ◆ Un nouveau bâtiment
pour le climat ◆

07

SUR LE VIF

◆ Le retour d'El Niño ◆
Des pluies qui mouillent
toujours plus ◆

09

LE POINT SUR

◆ Les sciences du climat ◆

19

SCIENCES EN BREF

◆ Quand l'ambrosie s'épanouit,
les allergies aussi ! ◆ Les volcans
acteurs du climat ◆ Maestro
passe à la vitesse supérieure ! ◆
Prédire le temps avec NAO ◆
Des géants endormis sous
les glaces de Sibérie ◆ Cobalt :
métal « précieux » pour aimants
permanents ◆ Le printemps résiste
au changement ◆ Chaud-froid dans
les briques ◆ Du bois dans
le plastique ◆ Gestion à la carte
du confort thermique ◆
Des moteurs dopés à la chaleur ◆

23

KIOSQUE

www.cea.fr



12

DOSSIER

COP 21 : rencontres au sommet des 2 °C

FRÉDÉRIC JOURNÈS

Directeur des Relations
Internationales du CEA



© L. Godart/CEA

Se positionner sur un marché mondial de l'énergie en pleine redéfinition

La problématique du changement climatique traitée par la COP 21 étant par essence mondiale, le déploiement des énergies bas carbone ne connaît pas de frontières. Dans ce contexte, des équipes du CEA sillonnent la planète pour diffuser leur offre technologique.

Propos recueillis par Aude Ganier

En tant qu'acteur historique de la communauté mondiale du nucléaire, la présence du CEA à l'international n'est pas un fait nouveau...

Les activités de la direction des Relations Internationales du CEA relèvent en effet d'une mission régaliennne historique. Celle d'assurer la représentation de l'État au sein de grandes organisations internationales (AIEA, AEN, OCDE...)

et de conseiller le gouvernement pour les questions de politique nucléaire extérieure et de contrôle des exportations. Pour ce faire, nous disposons d'un réseau de conseillers nucléaires, hébergés dans une dizaine d'ambassades de France. Le CEA entretient ainsi depuis longtemps des relations avec les grandes puissances nucléaires mondiales. Et ces relations sont amenées à se renforcer eu égard aux tendances énergétiques actuelles : la Chine développe fortement son parc électronucléaire ; la Russie continue de soutenir l'ensemble de sa filière ; le Japon, malgré la baisse annoncée de la part du nucléaire dans son mix énergétique (de 28 à 22 %), mise sur la quatrième génération, notamment en coopérant sur le projet Astrid piloté par le CEA-DEN. Aux États-Unis, la situation est un peu différente en raison de l'apparition des gaz de schiste dans

la donne énergétique ; l'intérêt pour le nucléaire s'y réoriente vers les petits réacteurs SMR¹ pour l'électricité et le chauffage urbain.

Le CEA participe également à la promotion et au développement d'une utilisation sûre et durable de l'énergie nucléaire, en direction des pays émergés comme l'Inde ou l'Afrique du Sud... Dans ce cadre, il apporte son expertise sur l'ensemble de la chaîne de valeur et contribue à créer un environnement favorable à la conclusion de contrats commerciaux internationaux.

Dans le domaine des énergies renouvelables, ces dernières années ont vu apparaître une nouvelle dimension de l'action du CEA à l'international. Quelle est-elle ?

Le CEA intervient de plus en plus comme un support direct au développement à l'export

Note :
1. Small Modular Reactor.

de ses partenaires industriels. Ce positionnement résulte d'une autre mission confiée au CEA à partir des années 2010 pour contribuer à la réindustrialisation de la France. Et le contexte industriel difficile nécessite que la France se positionne sur les marchés internationaux qui sont des leviers de croissance incontournables. Des opportunités existent car le système est en radical changement. Nous assistons aujourd'hui à une redéfinition complète du marché global de l'énergie. Avant, les producteurs-distributeurs en étaient les principaux acteurs ; désormais, les productions vont se décentraliser et la concurrence est rude, en particulier dans les énergies renouvelables. Dans cette perspective, CEA Tech a aujourd'hui atteint une masse critique pour s'ouvrir à l'international, tout en ciblant le développement des partenaires français. Et ce, sur de nombreux fronts, comme le Japon, les États-Unis mais aussi l'Amérique latine, l'Afrique, l'Inde...

Les enjeux de la COP 21 trouvent-ils un écho à votre activité ?

Le CEA est nécessairement concerné par la COP 21 et les suites qui lui seront données. Acteur majeur du nucléaire qui permet d'assurer une énergie de base bas carbone, il est également un grand pourvoyeur de technologies innovantes pour les énergies renouvelables, adaptées à un mode de production distribué. La COP 21 est un événement moteur pour construire des trajectoires énergétiques et économiques. Il est en effet capital de définir un cap partagé par tout le monde et de se fixer des objectifs. Cela implique de concrétiser sur le terrain de nouveaux modèles organisationnels pour construire les outils nécessaires à l'atteinte des objectifs (par exemple, les partenariats publics-privés). Le Fonds vert pour le climat² va créer d'importantes dynamiques d'équipements dans le monde, et les approches globales du climat

vont largement reposer sur la diffusion des technologies les plus performantes. Le CEA se mobilise pour appuyer ces actions.

Quelle est l'approche du CEA pour diffuser à l'international ses innovations dans les énergies renouvelables ?

De manière générale, le CEA joue le rôle d'opérateur technique et de fédérateur de consortiums industriels. Comme pour le nucléaire, il s'agit de valoriser notre offre technique, proposer à des partenaires extérieurs notre expérience pour les aider à intégrer la chaîne de la valeur, tout en poussant des entreprises françaises partenaires. Cette approche est très variable suivant le type de pays (industrialisé, émergé, émergent). Nous avons de belles réussites, dans un contexte pourtant difficile lié notamment à une différence de culture sur les enjeux de l'innovation. Un premier exemple est celui d'un contrat de 90 millions d'euros signé, en 2011, par des PME françaises de l'industrie solaire avec le Kazakhstan pour y créer une usine clés en main de fabrication de lingots de silicium. Cela a également permis de structurer une filière industrielle française d'équipementiers et de fabricants de consommables.

Tout aussi emblématique, un premier contrat vient d'être signé avec la Bolivie pour lui permettre d'initier sa propre industrie de valorisation du lithium. Autre exemple, celui de la Colombie, pays très prometteur avec lequel nous échangeons en lien avec l'Agence française du développement. De même, en octobre dernier, le CEA a initié un processus de collaboration avec la Société africaine des biocarburants et des énergies renouvelables. Dans le cadre de la transition énergétique de l'Afrique et de la dynamique de la COP 21, nous travaillons à l'émergence d'une industrie locale et à la création d'emplois à forte valeur ajoutée, notamment dans les secteurs de l'électrification rurale et de l'éclairage public.

Nous sommes dans une approche résolument gagnant-gagnant. Dans les pays industrialisés, la démarche est différente mais le CEA, par la qualité de ses travaux sur des sujets très pointus, parvient à intéresser des partenaires qui sont des géants mondiaux. Il s'agit d'un travail de longue haleine, initié notamment par le CEA-Leti qui, depuis une dizaine d'années, organise des événements aux États-Unis et au Japon. CEA Tech dispose aujourd'hui d'une représentation dans ces deux pays.

Qu'en est-il de la dimension européenne ?

D'une part, l'Europe est un pilier essentiel du ressourcement scientifique. Les équipes du CEA, et leurs partenaires académiques, doivent ainsi se mobiliser pour obtenir le financement de leurs recherches moyen et long terme

Le CEA joue le rôle d'opérateur technique et de fédérateur de consortiums industriels.

dans le cadre du programme-cadre Horizon 2020 de la Commission européenne. C'est un effort essentiel, qui n'est pas simple car la concurrence est rude face à des acteurs du Sud plus agressifs pour obtenir les fonds et face aux pays de l'Est qui ont « musclé » leurs compétences et leur taux de réussite sur les projets qu'ils soumettent. D'autre part, le marché européen offre des perspectives à l'industrie française. C'est pourquoi nous avons la même démarche de prospective commerciale pour valoriser nos technologies et nos partenaires. Le travail est très dense avec la Pologne et le Royaume-Uni, que cela soit sur des sujets communs de recherche ou sur des projets industriels prioritaires pour EDF et Areva. ♦

Note :
2. Mécanisme financier de l'ONU pour réaliser des transferts de fonds en direction des pays les plus vulnérables au changement climatique.

Entrée de l'exposition « Le CEA, 7 décennies de recherche et d'innovation ».

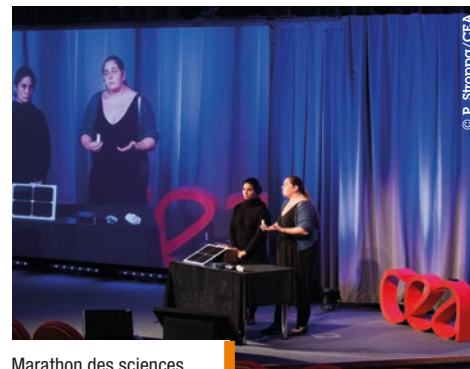


Ségolène Royal.

Événement

Le CEA fête ses 70 ans!

Plus de 400 personnes ont assisté à la soirée des 70 ans du CEA, à la Cité des sciences et de l'industrie le 7 octobre dernier, en présence de nombreuses personnalités scientifiques et politiques. À cette occasion, la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie a insisté sur la place du CEA au cœur des enjeux d'aujourd'hui et de demain, et sur son « rôle central dans la transition énergétique et climatique de la France, pour trouver des solutions et réaliser des ruptures technologiques qui pourront être utilisées dans le monde entier dans la lutte contre le dérèglement climatique ». Le secrétaire d'État à l'Enseignement supérieur et à la Recherche a, quant à lui, tenu à saluer « le collectif des équipes animées par une foi dans l'État, dans le service public, dans notre pays ». Les célébrations se sont poursuivies pendant quatre jours, lors desquels scolaires et grand public ont pu échanger avec les chercheurs, assister à un marathon des sciences et même à une pièce de théâtre...



Marathon des sciences.



Accueil de plus de 400 élèves.



Thierry Mandon.



Daniel Verwaerde et Yves Bréchet.



Pièce de théâtre « Gros, grand, bruyant mais fiable à 100 % ».

Relations internationales

La French Tech nucléaire et renouvelable au Japon



Manuel Valls, Emmanuel Macron et Daniel Verwaerde sur le stand CEA Tech.

Élection

Une chercheuse du CEA à la tête du groupe scientifique du Giec



Valérie Masson-Delmotte.

« Je suis très heureuse que la compétence française en matière de climatologie soit reconnue de par le monde » a réagi Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au CEA, à l'annonce de son élection à la coprésidence du groupe scientifique du Giec¹.

Avec le climatologue chinois Panmao Zhai, elle coordonnera les travaux de plusieurs centaines de scientifiques pour synthétiser les causes et évolutions du changement climatique. Première étape : choix des thématiques de quelques rapports spéciaux ; définition de la structure du 6^e rapport du Giec (sortie prévue en 2021) ; proposition d'innovations pour la communication des résultats.

Note :

1. Filière hydrogène, gestion de l'énergie, énergie solaire, capture de mouvement, communication et protocoles, imagerie, interfaces homme-machine, fonctionnalisation des matériaux.

Note :

1. Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat.

En digne ambassadeur, le CEA participait à l'exposition *La France est innovante*, organisée au Miraikan de Tokyo du 4 au 6 octobre dernier. Cet événement inaugurerait l'année franco-japonaise de l'innovation et lançait la campagne mondiale Creative France.

Grâce à un showroom itinérant, l'équipe CEA Tech Japon a présenté 18 démonstrateurs couvrant 8 thématiques¹. L'occasion de rappeler le positionnement du CEA et sa capacité à assurer la maturation complète des technologies, de la recherche à l'industrie. Dans la perspective de la COP 21, un accent particulier a été mis sur la filière hydrogène, les batteries et la gestion de l'énergie.

En marge de l'événement, le Premier ministre français et son homologue japonais ont organisé une réunion sur la coopération franco-japonaise dans le domaine du nucléaire. Ils ont notamment rappelé le rôle du nucléaire dans la lutte contre les dérèglements climatiques ainsi que sa contribution à l'indépendance énergétique et à la compétitivité économique. Ils ont également appelé à approfondir la coopération sur les réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération, en particulier autour du projet Astrid que pilote le CEA-DEN. Objet d'une forte coopération avec des partenaires japonais, ses innovations principales ont également été présentées au Miraikan.



Florence Lambert, directrice du CEA-Liten, avec des industriels.

Plateforme européenne

Le HPC accélère la transition vers les énergies bas carbone

Dans le cadre du volet Calcul haute-performance (HPC) du programme-cadre Horizon 2020, la Commission européenne se dote d'un centre d'excellence en simulation numérique exclusivement dédié à l'énergie. Piloté par la Maison de la simulation¹ du plateau de Saclay, le centre EoCoE² rassemble 23 instituts de 8 pays. Objectif : améliorer les outils de simulation numérique pour contribuer, sur les court et moyen termes, au développement et au déploiement des technologies bas carbone. Quatre thématiques applicatives figurent dans la feuille de route d'EoCoE : météorologie, matériaux, eau et fusion nucléaire. Ils sont soutenus par une base transversale et pluridisciplinaire qui fournira une expertise de haut niveau en mathématique appliquée et HPC. « Concernant par exemple les matériaux (ceux des technologies photovoltaïques, du stockage d'énergie...), nous avons besoin de moyens performants pour simuler, avec des techniques de criblage haut débit, des centaines de matériaux et ainsi analyser leurs propriétés » détaille Edouard Audit, ingénieur CEA et directeur de la Maison de la simulation. De même, la communauté scientifique aura fort à faire avec la gestion des entrées et sorties des données qui nécessite, par exemple, de traiter et extraire des



données complexes et volumineuses sans arrêter pour autant les calculs en cours...

Doté d'une enveloppe de 5,5 millions d'euros sur trois ans, l'enjeu scientifique est d'adapter les logiciels et méthodes numériques à la future génération de supercalculateurs, de plus en plus complexes car moins économes. EoCoE s'inscrit dans l'un des 3 piliers de la politique européenne pour le calcul intensif ; les deux autres étant dédiés au développement de nouvelles technologies du HPC (notamment en vue de l'exascale) et aux moyens de calcul mis à disposition des chercheurs européens (infrastructure Prace).

Notes :

1. CEA, CNRS, Inria, Universités Paris-Sud et Versailles-Saint-Quentin.

2. Energy oriented Center of Excellence.

Infrastructures

Un nouveau bâtiment pour le climat

Le projet d'Infrastructure pour le climat et l'environnement (Ice) est lancé en présence de Thierry Mandon, secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Un bâtiment de 10 500 m² permettra de réunir l'ensemble des équipes du LSCE sur le site CEA de l'Orme des merisiers.

« Les sciences du climat et de l'environnement s'engagent au service de la société. Aussi faut-il un outil à la hauteur des ambitions » s'est exprimé Gilles Bloch, président de l'université Paris Saclay.

Soutenu par le Conseil départemental, le Conseil régional d'Ile-de-France, l'État et le CEA, Ice inclut des installations spécialisées telles que des salles blanches qui abriteront notamment des spectromètres de masse, une chambre isolée du champ magnétique terrestre et une casemate de mesures de très faible radioactivité. Une terrasse dédiée à l'expérimentation permettra par ailleurs des mesures de la structure verticale de l'atmosphère par la technologie Lidar.

Pour l'ensemble du projet, une attention particulière a été apportée à la qualité environnementale en construisant un bâtiment durable.

DÉPÊCHES

14 OCTOBRE

Fermentalg et une équipe du CEA-IRTSV poursuivent leur partenariat à travers le programme Trans'Alg. Avec un budget de 31,2 M€ sur 5 ans, il a pour objectif la production massive de matières premières biosourcées de substitution aux produits pétroliers. Le programme associe également les industriels Arkema et Soprema, les PME Condat et Pierre Guérin, ainsi que des laboratoires du CNRS.

23 SEPTEMBRE

Avec la société Raigi, le CEA-DAM signe un accord d'option de licence de sa technologie de fabrication des liners destinés au marché du stockage d'hydrogène. Rappel : les liners en polymère sont les vessies d'étanchéité à l'hydrogène dans les réservoirs haute pression de type 4. Cette technologie va permettre à la société Raigi de devenir un acteur industriel français de premier plan dans l'essor de la filière hydrogène.

23 SEPTEMBRE

Le CEA-DEN et la société japonaise Tokyo Electric Power Company (TEPCO), en charge du démantèlement de la centrale de Fukushima-Daiichi, signent un accord de coopération pour favoriser leurs échanges d'informations dans le domaine de l'assainissement et du démantèlement des installations nucléaires : gestion des opérations, conduite de projets, développement de nouveaux procédés ou technologies.

Sciences du climat

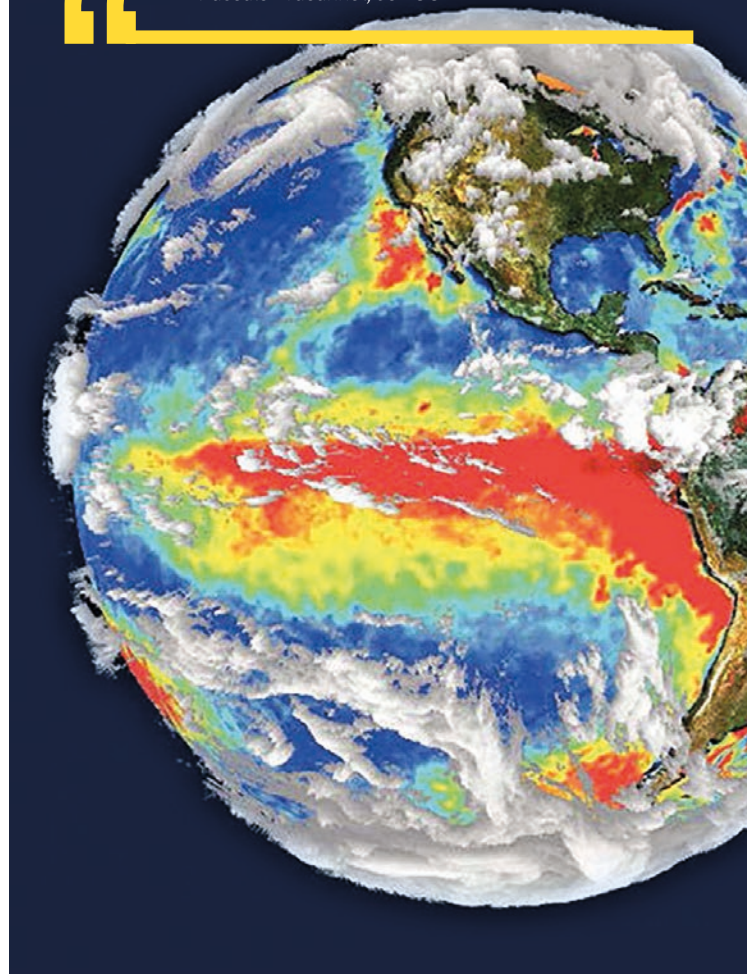
Le retour d'El Niño

Un épisode El Niño, enfant terrible du climat, est prévu cette année. L'occasion de rappeler l'origine du phénomène et les moyens permettant de le prévoir. Moyens en cours d'amélioration notamment à travers le projet El Paso.

par Amélie Lorec

L'analyse des archives naturelles des côtes péruviennes nous permet d'étudier El Niño sur 9000 ans.

Pascale Bracannot, du LSCE



Vue satellite de la température de la surface de la mer et de la couverture nuageuse lors d'El Niño de 1997-1998.

5 ans après sa dernière apparition, El Niño refait surface dans l'océan Pacifique tropical ! Un nouvel épisode de forte intensité qui a 95 % de chance de se prolonger jusqu'au printemps 2016¹. Dès le printemps 2015, des climatologues américains et australiens ont en effet constaté une hausse de 1 °C (au-dessus de la normale) de la température de la surface de la mer dans l'ouest et le centre du Pacifique tropical.

Des vents qui font la pluie et le beau temps

Petit rappel : en conditions normales, les alizés soufflent depuis l'est (du Pérou vers les Philippines) et confinent un important volume d'eau chaude à l'ouest (« warm pool », au voisinage de l'archipel indonésien). Lors des événements El Niño, tous les trois à sept ans, ces vents faiblissent drastiquement allant jusqu'à s'inverser sur une partie du Pacifique cette année. Ils provoquent alors l'écoulement progressif de cet immense réservoir d'eau chaude vers l'est du Pacifique. Inondations, sécheresse, perturbation de la mousson, écosystème marin appauvri... de nombreuses régions du globe (Amérique Centrale, Australie, Indonésie...) peuvent alors être affectées. L'Europe du Nord en revanche serait faiblement touchée avec une tendance à un hiver plus sec et froid.

Pas si prévisible

Peut-on prévoir El Niño? La période 1997-1998 a vu l'épisode le plus intense du siècle, pour autant la prévision a échoué. Il y a donc une forte mobilisation pour mieux observer le phénomène, comprendre son développement et améliorer sa prévision. Car, de nombreuses incertitudes persistent sur la **variabilité** des épisodes El Niño et sur leur lien avec le réchauffement climatique. « Dans le cadre du projet ANR El Paso, nous travaillons sur des archives naturelles des côtes péruviennes (coraux, bivalves géants et mollusques) pour étudier El Niño sur 9 000 ans, avec une résolution saisonnière à décennale. Ces données nous permettent d'évaluer les simulations climatiques en rendant compte de la capacité des modèles à reproduire les épisodes passés. Or, les résultats indiquent une sous-estimation de 20 à 80 % des changements d'amplitude de ce phénomène » explique Pascale Bracannot, climatologue au LSCE. Identifier les facteurs clefs apportant une meilleure prévision d'El Niño, et ainsi mieux anticiper son évolution dans le futur, est inscrit dans les priorités de la recherche mondiale sur le climat. ♦

Note :

1. Selon les derniers bulletins d'information diffusés par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Variabilité

Évolution de l'amplitude et de la fréquence du phénomène.

Sciences du climat

Des pluies qui mouillent toujours plus

Les épisodes cévenols seront-ils plus fréquents voire plus intenses à l'avenir ? Une étude livre des statistiques qui confirment cette tendance, sans toutefois pouvoir la corréler avec certitude au changement climatique.

par Vahé ter Minassian

Note :
1. Le service
météorologique
néerlandais.

Phénomènes bien connus des habitants du sud de la France, les épisodes « cévenols » correspondent à des pluies très localisées tombant à l'automne dans les Cévennes. Provoquées par l'arrivée, sur les contreforts du massif montagneux, de masses d'air chaudes et humides en provenance de Méditerranée, ces précipitations sont souvent très intenses : leur pluviométrie pouvant dépasser en une journée celle de Paris sur toute une année !

Une équipe du **LSCE**, de Météo-France et du KNMI¹ a établi que les cumuls de pluie des « épisodes cévenols » les plus intenses ont significativement augmenté en un demi-siècle. Selon elle, la probabilité de voir un site des Cévennes frappé par l'une de ces pluies extrêmes (comme en octobre 2014), a en moyenne triplé depuis 1950 ! Cette conclusion, les chercheurs l'ont obtenue en travaillant sur les archives

de 14 stations météorologiques de la région. Pour chaque automne, ils ont repéré la journée la plus pluvieuse, noté la pluviométrie correspondante, avant de procéder à une analyse statistique. Le résultat, publié dans le « *Bulletin de la société météorologique américaine* », est éclairant : à l'échelle de la totalité du massif, l'intensité des épisodes cévenols a crû de l'ordre de 4 % par décennie en moyenne ; et la probabilité, pour un endroit donné des Cévennes, de recevoir plus de 330 mm d'eau en une journée est de 1 fois tous les 300 ans en 2015, contre 1 fois tous les 1 000 ans en 1950.

Comment expliquer une telle variation ? « *Il est, bien sûr, tentant de l'attribuer au changement climatique global, et notamment à l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère due à l'activité humaine* », explique Robert Vautard du LSCE. « *Malheureusement, les modèles numériques actuels ne nous permettent pas de l'affirmer avec certitude. D'autant que d'autres phénomènes, comme des variations dans la teneur en aérosol de l'atmosphère ou des évolutions dans la dynamique des masses d'air pourraient aussi être à l'origine de cette modification de la météo cévenole.* » ♦

© Sébastien Sechinon
(facebook : sebschinon)

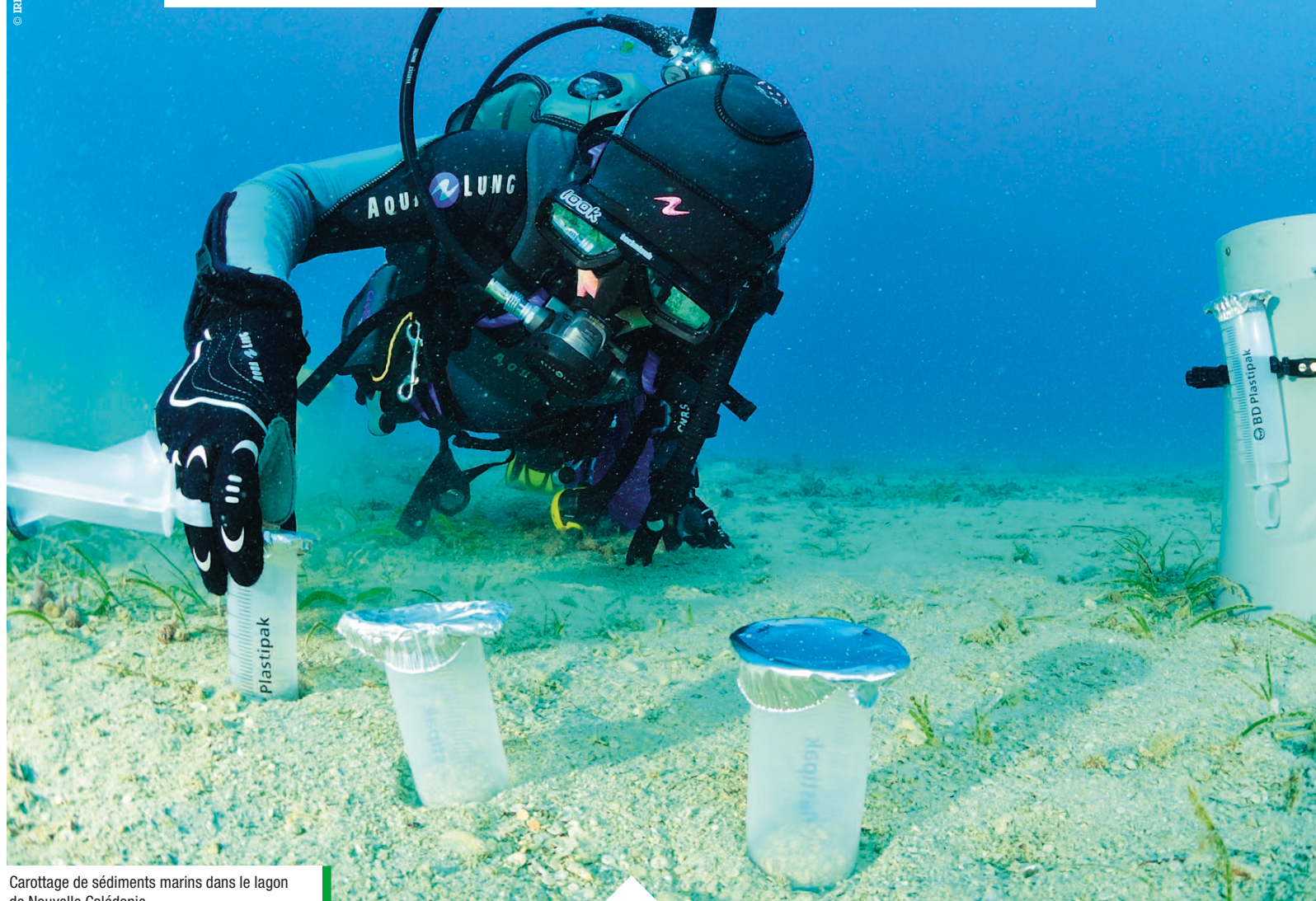


Épisode cévenol entre l'Hérault et le Gard, le 10 octobre 2014.

09 LE POINT SUR

Alors que la COP 21 tente de résoudre la problématique du réchauffement climatique, ce sont les recherches en sciences du climat qui ont permis de donner l'alerte.

par Amélie Lorec



Carottage de sédiments marins dans le lagon de Nouvelle Calédonie.

Les sciences **du climat**

Conjuguer le climat à tous les temps ! Voici le travail des climatologues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)¹ installé sur les sites CEA de Saclay et CNRS de Gif-sur-Yvette. Les scientifiques y étudient le climat actuel (de la fin du XIX^e siècle à nos jours) et retracent celui du passé (jusqu'à plusieurs millions d'années), afin de mieux se projeter dans l'avenir (le XXI^e siècle et au-delà). Pour cela, ils s'appuient sur des observations de terrain, sur des analyses à haute précision des processus dynamiques et biogéochimiques mis en jeu dans le système climatique, et sur la modélisation numérique. La Terre ne pouvant être observée partout et tout le temps, le recours aux modèles est incontournable. Et les observations et analyses des 160 dernières années du climat, ainsi que de périodes plus anciennes, ont permis de les développer et de les valider !

Comprendre le présent...

Pour comprendre le fonctionnement du climat contemporain, les scientifiques l'étudient à partir de campagnes scientifiques et de méthodes d'observation en continu, sur Terre, dans l'air et sur mer. Aujourd'hui, cela implique un réseau de près de 6 000 stations dans le monde, dont une cinquantaine en France. Parmi elles, celles de l'infrastructure de recherche Icos² mesurent en temps réel les concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère en Europe et dans les régions adjacentes. « Connaître les valeurs en CO₂, NO₂ et CH₄³ nous permet notamment d'améliorer la compréhension des émissions de GES. À terme, nous souhaiterions même pouvoir différencier les sources anthropiques des sources naturelles, et ainsi optimiser la représentation numérique des perturbations engendrées » explique Philippe Ciais, spécialiste du cycle global du carbone ♦♦♦

Notes :

1. Unité mixte de recherche CEA/CNRS/UVSQ.
2. Integrated Carbon Observation System.
3. Dioxyde de carbone, dioxyde d'azote et méthane.



Mât de mesure de GES du réseau ICOS.

au LSCE. Autres moyens de mesures pour mieux connaître le climat présent : des balises marines Argo qui relèvent en continu courants, températures, salinité, présence d'animaux marins... À cela s'ajoute « la révolution satellitaire » qui permet de couvrir toute la planète, y compris les zones difficilement observables (océans et latitudes polaires) et de quantifier les températures, les vents, le niveau des mers, l'étendue de la banquise...

Il est primordial d'entretenir les réseaux d'observation car une donnée non relevée est une donnée perdue à jamais

Philippe BOUSQUET, du LSCE

Depuis 1850, toutes ces méthodes d'observation, qui ont beaucoup évolué à partir du milieu du XIX^e siècle, démontrent un réchauffement important de l'atmosphère (+0,6 °C en 160 ans). Selon les régions du globe, ce dernier a différents impacts constatés ou attendus : réchauffement de l'océan; modification des précipitations ; recul des glaces et des neiges ; recrudescence des événements

climatiques extrêmes... Et d'après la synthèse des travaux scientifiques présentée par le GIEC⁴ en 2014 dans son 5^e rapport, ces changements sont attribuables de façon dominante à l'accumulation dans l'atmosphère de GES et d'aérosols, émis par les activités humaines. Pour affiner ces résultats, il faut pouvoir rendre compte sur le long terme de la qualité et de l'hétérogénéité des observations relevées de l'échelle d'une région à celle de la planète. « Nous avons besoin de longues séries de mesures directes. Il est donc primordial de maintenir et entretenir tous ces réseaux d'observations puisqu'une donnée non relevée est perdue à jamais » insiste Philippe Bousquet, professeur de l'UVSQ⁵ travaillant également sur le cycle du carbone au LSCE.

...Et s'appuyer sur le passé...

La compréhension du climat implique de pouvoir l'observer sur de grandes échelles de temps, notamment à des périodes clés de l'Histoire : les derniers 1 000 ans et leurs éruptions volcaniques, l'Holocène moyen (-6 000 ans) ; le dernier maximum glaciaire (- 21 000 ans) ; la dernière période interglaciaire (-130 000 à -115 000 ans) ; la période chaude du Pliocène moyen (-3,3 à 3 millions d'années). Pour remonter aussi loin, les scientifiques rassemblent des données issues d'archives historiques et naturelles. « On y retrouve le témoignage de la réponse du système climatique à différents éléments perturbateurs physiques ou biogéochimiques, comme le **forçage** solaire ou volcanique, qui agissent à différentes échelles de temps précise Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au LSCE. Seule la paléoclimatologie a par exemple pu appréhender les **rétroactions** lentes du système Terre. »

Les archives historiques sont des informations patiemment collectées par les historiens du climat, comme les dates de floraison, de vendanges, de gel/dégel de lacs, de hauteur de crue... Tandis que les archives naturelles proviennent de prélèvements et de carottages dans les grottes, glaciers, sédiments marins ou lacustres, coraux, ou encore les cernes des arbres. Des lieux qui protègent secrètement les empreintes indirectes des variations climatiques, jusqu'à plusieurs millions d'années en arrière. « Par exemple, les bulles d'air emprisonnées dans les carottes de glace sur le site Epica, en Antarctique de l'Est, renseignent sur la composition de l'atmosphère d'il y a 800 000 ans. Et leur analyse a permis de constater que les concentrations de gaz à effet de serre aujourd'hui étaient sans précédent depuis cette époque, raconte la chercheuse. Dans le cadre du projet Beyond Epica, nous essayons de remonter jusqu'à 1,5 million d'années. »

En parallèle, l'amélioration de la résolution temporelle des archives naturelles (grâce aux progrès analytiques) permet de reconstruire plus finement la **variabilité** rapide des climats du passé « pour vérifier la crédibilité des modèles à reproduire des perturbations et changements climatiques abrupts et très contrastés », indique Valérie Masson-Delmotte. La paléoclimatologie offre aussi une meilleure connaissance et appréhension de la variabilité du climat due à des éruptions volcaniques, au cycle solaire ou à

Notes :

4. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

5. Université Versailles-Saint-Quentin.

Forçage

Perturbation, qui peut être imposée au modèle, entraînant un changement du climat.

Rétroaction

Modification d'une composante du système climatique en raison du changement climatique, qui agira en retour sur le climat. Une rétroaction est dite positive si elle amplifie le réchauffement et négative si elle l'affaiblit.

Variabilité

Évolution de l'amplitude et de la fréquence des phénomènes.



**POURQUOI LE CEA
est expert en sciences
du climat ?**

Dès les années 1960, le CEA s'est spécialisé dans la détection et la mesure d'isotopes stables et radioactifs. Son expertise s'est étendue à la datation océanique et terrestre, par exemple des carottes de sédiments, utile à la paléoclimatologie. Ses compétences en calcul haute performance lui ont ensuite permis d'intégrer ces données dans des modèles climatiques, et ainsi développer une approche globale du climat et des grands cycles biogéochimiques.

une redistribution d'énergie au sein du système climatique. L'estimer est un enjeu important pour améliorer les modèles, et éventuellement anticiper des épisodes comme El Niño. Car l'objectif ultime de la modélisation est bien de simuler les climats futurs !

...Pour mieux se projeter dans l'avenir

Grâce à toutes ces données, les scientifiques peuvent s'assurer que les modèles de climat sont suffisamment fiables et robustes pour simuler les climats futurs. Que se passe-t-il si la teneur en CO₂ atmosphérique double d'ici 2100 ? Si les émissions de particules fines augmentent ? Si les zones de végétation naturelle sont réduites au profit de l'agriculture ? « Les modèles permettent des "projections climatiques" à partir de différents scénarios, comme ce fut le cas avec les RCP⁶ ayant servi à la rédaction du 5^e rapport du GIEC » explique Pascale Braconnot, climatologue au LSCE. Par exemple, la simulation issue du scénario à fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP8.5) présente un réchauffement de la planète de 3 à 5 °C d'ici à 2100. Conséquences : des régions deviennent plus humides et d'autres s'assèchent, entraînant possiblement des événements climatiques de plus en plus extrêmes. Quant au scénario le plus sobre (RCP2.6), il intègre les effets

d'une politique ambitieuse de réduction des émissions, seule susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C en 2100. « Ces projections ont pour but de susciter la réflexion et de comprendre comment le climat évolue dans différents contextes, en tenant compte de sa variabilité spontanée, de l'activité du Soleil, de celle des volcans et de l'influence des activités humaines » conclut la chercheuse.

Déjà très performants, les modèles climatiques continuent de s'améliorer. « Grâce à l'accroissement des connaissances sur le climat et au progrès du calcul intensif et du stockage de données, leurs résolutions temporelle et spatiale s'affinent. Ainsi que les processus pris en compte, comme les différentes rétroactions du système climatique » précise Philippe Ciais. Par ailleurs, les modèles de climat intègrent de nouvelles variables. Ce sera prochainement le cas du cycle phosphore, étudié par le LSCE dans le cadre du projet ERC⁷ « Synergie Imbalance ». Facteur limitant dans l'absorption du CO₂ par les plantes, la disponibilité du phosphore influe directement sur le climat. ♦

Notes :

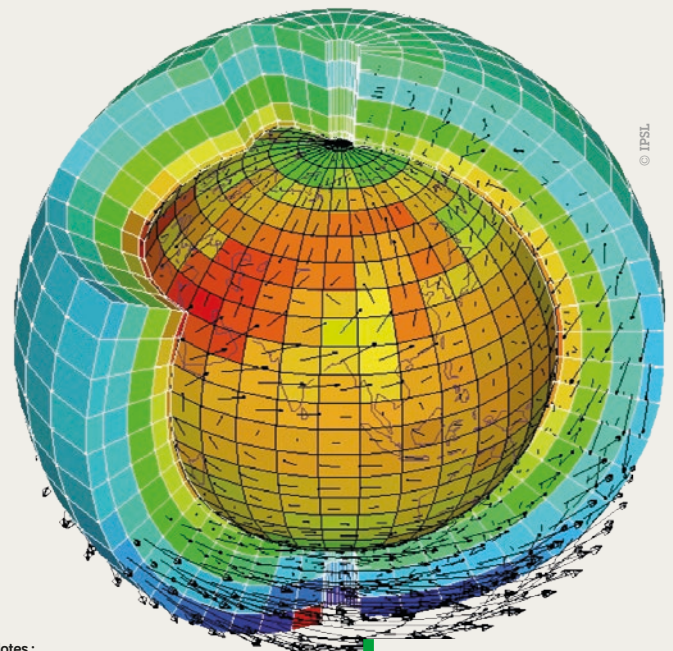
- 6. Representative Concentration Pathway.
- 7. European Research Council.

Fonctionnement d'un modèle climatique

Pour simuler le comportement du climat, le modèle découpe l'atmosphère et la surface de la Terre en mailles 3D de quelques centaines de kilomètres de côté. À l'intérieur de chaque maille sont représentés, par des jeux d'équations, l'ensemble des forces qui induisent les mouvements de fluides atmosphériques, océaniques et terrestres, les équilibres d'énergie et de masse, les lois thermodynamiques et les cycles biogéochimiques, comme celui du carbone. L'ensemble des interactions entre les différents compartiments du système Terre (continents, océans, végétation et glaces) est également pris en compte.

Ainsi, toutes les 6 minutes, le modèle est capable de calculer les variations météorologiques et climatiques (températures, vents et humidité) pour chaque maille et pour l'ensemble du globe.

Il existe une quarantaine de modèles climatiques Système Terre dans le monde, dont deux développés en France (l'un par l'Institut Pierre et Simon Laplace, dont dépend le LSCE, l'autre par Météo France). Tous réalisent des simulations les plus proches possibles de la réalité, avec toutefois un certain niveau d'incertitude qu'il faut considérer. Celle-ci peut être caractérisée et estimée en comparant les résultats des différents modèles. C'est d'ailleurs l'objet des projets d'intercomparaison CMIP⁶ et PMIP⁷, coordonné par le LSCE.



Notes :
6. Coupled Model Intercomparison Project

7. Paleoclimate Modelling Intercomparison Project

Modèle Système Terre de l'IPSL.



Modules photovoltaïques à concentration réalisés par le CEA-Liten pour déployer l'énergie solaire dans le mix énergétique.

COP 21 : rencontres au sommet des 2°C

P.14

Vous avez dit
« 2°C » ?

P.19

108 technologies
pour 2°C

L'événement COP 21 pourrait bien être historique, tant la mobilisation internationale pour limiter le réchauffement moyen global à 2 °C, à l'horizon 2100, apparaît sans précédent. Sera-t-elle suffisante ? Tout dépendra des 196 États invités à accélérer leur transition vers des économies sobres en carbone.

À leur contribution répond celle de la communauté scientifique pour affiner le diagnostic climatique et développer de nouvelles technologies, en particulier dans le domaine de l'énergie.

Dans ce contexte, le CEA est plus que jamais investi. En plus des sciences du climat, de la R&D pour le nucléaire et les énergies renouvelables, il mobilise ses experts en technico-économie.

par Aude Ganier

Vous avez dit « 2 °C » ?

L'objectif des « 2 °C » est énoncé depuis la fin du XX^e siècle. Et ce n'est pas un chiffre lancé au hasard ! Il résulte de milliers de publications scientifiques dont celles du CEA, synthétisées par le Giec, qui invitent les États à prendre leur responsabilité pour limiter le changement climatique...



RÉCHAUFFEMENT MOYEN GLOBAL DE LA PLANÈTE À NE PAS DÉPASSER À L'HORIZON 2100

100

milliards/an



DOTATION DU FONDS VERT (ASSURANCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE) À ASSURER PAR LES 196 PARTIES PRENANTES DE LA COP 21

Notes :

1. Dont le protocole de Kyoto adopté en décembre 1997 par 55 parties pour, entre 2008 et 2012, réduire de 5 % leurs émissions de GES par rapport à 1990.

2. Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, CEA/CNRS/UVSQ

Anthropique

Sous l'action de l'homme, par opposition à « naturel »

Business as usual

Expression (« les affaires continuent ») décrivant la poursuite des activités économiques, dans les mêmes volumes, proportions et modes organisationnels.



Notre maison brûle... et nous regardons ailleurs » déplorait en 2002 le Président de la République française, à

la tribune du IV^e Sommet de la Terre de Johannesburg. En 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), alors tout juste institué par l'ONU, avait lancé de premières alertes. Après de nombreux rapports, sommets et protocoles¹, la quasi-totalité des États de la planète adoptait enfin, en 2009, l'objectif de « contenir, à l'horizon 2100, l'élévation globale de la température moyenne en-dessous de 2 °C par rapport au niveau préindustriel ». Aujourd'hui, à Paris, les 196 pays de la XXI^e Conférence des parties de la

convention-cadre de l'ONU sur les changements climatiques (COP 21), se réunissent pour tenter de concrétiser cet enjeu...

La maison Terre change

Cette mobilisation politique s'appuie sur les conclusions de la communauté scientifique internationale, dont celles du LSCE², synthétisées dans les rapports du Giec. Jean Jouzel, paléoclimatologue du CEA et vice-président du groupe scientifique du Giec de 2002 à 2015, énonce : « La température moyenne à la surface du globe a déjà augmenté de 0,6 °C en moyenne depuis la période préindustrielle. Le 5^e rapport du Giec constate que beaucoup des changements observés depuis 1950 sont sans précédent sur les dernières décennies voire dernier millénaire. » Pour cause, la période 1983-2012 a été la plus chaude des 1 400 dernières années dans l'hémisphère Nord. En France métropolitaine, l'année 2014 a battu le record de 1900 ; tout comme le mois de septembre 2015, enregistré comme le plus chaud de la planète depuis 1880. Dans de nombreuses

régions, l'évolution des précipitations, la fonte des neiges et des glaces, ont déjà modifié les systèmes hydrologiques, affectant la qualité et la quantité des ressources en eau. De nombreuses espèces animales et végétales ont adapté leur comportement au changement climatique. Et que dire des populations insulaires menacées d'être submergées...

Jusqu'où peut aller le réchauffement climatique, que le Giec lie aux émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine **anthropique** ? Plusieurs trajectoires ont été élaborées par les climatologues : depuis un scénario « sobre » qui limiterait le réchauffement moyen global à 2 °C, jusqu'au scénario « émetteur » du **business as usual** qui embarquerait l'humanité au-delà de 4 °C. Les experts ont également évalué cinq catégories de risques : systèmes uniques menacés (banquise, récifs coralliens) ; événements météorologiques extrêmes (cyclones, sécheresses, inondations) ; répartition des incidences (vulnérabilité des populations et régions défavorisées) ; incidences mondiales cumulées (perte de la biodiversité, sécurité alimentaire...) ; phénomènes particuliers de grande échelle (élévation du niveau de la mer, fonte de la calotte du Groenland). Verdict : au-delà de 2 °C, toutes les catégories sont dans le rouge, c'est-à-dire à un niveau élevé de risques ; et, à partir de 4 °C, les « systèmes uniques » et la « répartition des incidences » y sont extrêmement exposés.

Terriens, au rapport !

Le Giec a précisément cerné l'objectif « 2 °C ». « L'ensemble des émissions de CO₂ anthropiques ne devrait pas dépasser 2 900 milliards de tonnes (Gt). Or, plus des deux-tiers (2 000 Gt) ont déjà été émis depuis la révolution industrielle de 1850. Rappelons que le CO₂ disparaît très lentement de l'atmosphère et que c'est la quantité cumulée qui détermine le réchauffement moyen à l'horizon 2100. En d'autres termes, le cumul des émissions futures ne devra pas excéder 800 Gt, ce qui au rythme actuel équivaut à moins de 25 années

Le cumul des émissions futures ne devra pas excéder 800 Gt, ce qui, au rythme actuel, équivaut à moins de 25 années d'émissions...

Jean Jouzel, paléoclimatologue au CEA



Facteur 4

Réduction de 75 % des émissions de GES des pays industrialisés (dont la France) en 2050 par rapport à 1990, afin de réduire de moitié les émissions mondiales de GES à la même échéance.

d'émissions ! En réalité, ce sont 80 % des réserves fossiles mondiales qu'il faut laisser dans les sous-sols... » prévient Jean Jouzel.

Aux dires du paléoclimatologue, il n'est pas trop tard pour agir... À condition que les États fournissent immédiatement d'intenses efforts dans la maîtrise de leurs émissions. Celles-ci dépendent de différents paramètres : taille de la population, activité économique, modes de vie, utilisation des terres, politique climatique. « Par ailleurs, le développement de la recherche, le transfert des technologies vers l'industrie et le développement industriel dans les pays en voie de développement sont essentiels. L'AIE estime qu'il faudra tripler l'effort de R&D au niveau mondial d'ici 2050 » ajoute Jean-Guy Devezéaux de Lavergne, directeur de l'institut de technico-économie (CEA-I-Tésé). L'enjeu de la COP 21 est d'aboutir à un accord universel, quantitatif et contraignant, sur les moyens concrets, relatifs

au « Facteur 4 », à adopter pour lutter efficacement contre le dérèglement climatique. Il s'agira également d'accélérer la transition vers des sociétés résilientes et sobres en carbone (notamment celui d'origine fossile). Aux États donc de s'engager sur leur système énergétique³ et de doter le Fonds Vert des 100 milliards de dollars par an nécessaires pour aider les populations à lutter et réparer les dommages à venir.

« L'exception française »

Pays hôte de la conférence, la France se montre digne de l'événement. Il est vrai que son électricité est à 95 % « décarbonnée » : 1,1 % de photovoltaïque, 3,1 % d'éolien, 12,6 % d'hydraulique et 77 % de nucléaire⁴. « L'énergie nucléaire émet en moyenne 15 g de CO₂/kWh, 50 fois moins que le charbon (700 g/kWh), 3 fois moins que le photovoltaïque (45 g/kWh) et au même niveau que l'éolien (11 g/kWh) » rappelle Christophe Béhar, directeur du CEA-Den.

La France entend toutefois optimiser son système énergétique, par exemple au niveau de la sobriété et de l'efficacité des transports et bâtiments. La loi Transition énergétique pour la croissance verte (TECV), promulguée en août dernier, fixe des objectifs ambitieux. « Cette loi (...) fait le choix de ne pas opposer les énergies les unes aux autres. Elle pérennise sur le long terme un socle d'énergie nucléaire à 50 % de la production d'électricité (...) et permet d'accélérer l'essor des énergies renouvelables (...) indiquait

notamment la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie lors de la célébration des 70 ans du CEA ; rappelant à cette occasion le rôle central du CEA pour la transition énergétique et climatique, dans l'énergie nucléaire : « le CEA doit poursuivre son engagement (...) dans l'optimisation du parc actuel de réacteurs nucléaires (...), la préparation des réacteurs de demain, en particulier à travers le projet Astrid », et

Le CEA s'est fortement mobilisé sur les technologies d'intérêt national pour lesquelles sa valeur ajoutée est incontestable

Ségolène Royal, ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

dans les énergies renouvelables : « le CEA s'est fortement mobilisé sur les technologies d'intérêt national pour lesquelles sa valeur ajoutée est incontestable⁵ ». Un rôle également salué par le Président de la République, à l'Institut national de l'énergie solaire (INES), dans une dimension toute aussi déterminante : « s'il n'y avait pas le CEA (...) il n'y aurait pas non plus, pour les industriels, la possibilité d'aller jusqu'au bout de leurs intentions et donc de leurs investissements⁶ ». En effet, chercheurs, entrepreneurs, décideurs... toutes les forces vives des sociétés sont aujourd'hui conviées à s'engager pour que la COP 21 puisse calmer la machine climatique. ♦

Notes :

3. À travers leur contribution appelée INDC (Intended Nationally Determined Contributions).

4. Voir Bilan électrique 2014. www.rte-france.com/

Notes :

5. Extraits du discours du 7 octobre 2015 pour la célébration des 70 ans du CEA.

6. Extrait de la déclaration du 20 août 2015 lors de la visite de l'INES.

WWW

COP 21

www.cop21.gouv.fr

Loi TECV

www.developpement-durable.gouv.fr

Loi Transition énergétique pour la croissance verte (TECV)

-40 %

D'ÉMISSIONS DE GES EN 2030 PAR RAPPORT À 1990

-30 %

DE CONSOMMATION D'ÉNERGIES FOSSILES EN 2030 PAR RAPPORT À 2012

32 %

D'ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE EN 2030 (40 % DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ)

50 %

DE RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE FINALE EN 2050 PAR RAPPORT À 2012

50 %

PART DU NUCLÉAIRE DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE À L'HORIZON 2025

-50 %

DE DÉCHETS MIS EN DÉCHARGE À L'HORIZON 2025

108 technologies pour 2°C

Seuls les mix énergétiques bas carbone permettront de contenir le réchauffement moyen global à 2 °C. Pour autant, dans quelles conditions les États pourront-ils opérer ce virage énergétique ? C'est l'objet de l'étude *Decarbonization Wedges*, à laquelle contribuent les experts scientifiques et technico-économiques du CEA.

Notes :

1. Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'Énergie, fondée en 2009 par le CEA, le CNRS, l'IFPEN et la conférence des présidents d'universités (CPU) avec 15 autres organismes de recherche et des partenaires industriels.
2. Étude en cours de finalisation qui sera présentée le 11 décembre lors de la clôture de la COP21.
3. Institut du développement durable et des relations internationales.
4. Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, États-Unis, France, Inde, Indonésie, Italie, Japon, Mexique, Royaume-Uni, Russie.
5. Selon les équations de kaya et la méthodologie des effets.
6. *World Energy Outlook*, AIE, 2014.

Quels que soient les futurs engagements des 196 États lors de la COP 21, la communauté internationale s'est emparée du sujet. Depuis la COP 15 de Copenhague en 2009, de nombreux spécialistes mettent à l'épreuve les visions et les politiques nationales pour esquisser des trajectoires énergétiques à même de limiter le réchauffement moyen global à 2 °C. Parmi eux, des experts de seize pays représentant 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), ont participé au *Deep Decarbonization Pathways Project* (DDPP). En lien avec cette initiative, l'Alliance Ancre¹ conduit un travail inédit d'identification, à l'échelle internationale, des technologies disponibles et de leur déploiement à 2050 : l'étude *Decarbonization Wedges* (DW)², pilotée par le CEA, le CNRS et l'IFPEN.

Sustainable Development Solutions Network de l'ONU ont lancé le projet DDPP. Objectif : construire les trajectoires de « décarbonisation » de seize pays⁴ par des équipes de recherche locales dont une française, en partant de l'objectif long terme à atteindre (2050) pour en interroger les conditions nécessaires à court terme (dès à présent) et éclairer les politiques. Pour cela, les experts ont pris en compte, dans une approche multidisciplinaire, toutes les spécificités socio-économiques des États. Par exemple, comme l'illustre Hélène Burlet, adjointe au directeur du CEA-Liten : « dans certains pays, cela n'a pas de sens de favoriser le véhicule électrique pour diminuer les émissions de GES, si l'électricité est produite à partir d'énergies émettant du CO₂... »

Les résultats de DDPP sont encourageants. Première conclusion : l'élaboration de ces trajectoires spécifiques laisse envisager de réelles transformations, car les aspirations socio-économiques des pays apparaissent compatibles avec l'objectif de décarbonisation. Autre conclusion : la transformation économique et énergétique nécessite une réelle coopération internationale dans le domaine des nouvelles technologies pour l'énergie (NTE), notamment pour rationaliser les coûts.

Le monde technologique est petit !

En effet, du déploiement des NTE dépendra la mise en œuvre des trajectoires des États, au-delà des seize pays concernés par DDPP. Cet enjeu est au cœur de l'étude DW de l'Ancre, inspirée d'un travail initié par Pacola

& Socolow qui avait identifié en 2004 sept technologies pour stabiliser les émissions de GES. « L'enjeu est désormais de limiter ces émissions et nous avons recensé 108 technologies ! » indique Jean-Guy Devezeaux de Lavergne.

L'étude DW repose en premier lieu sur une approche macroscopique des forces en présence, à partir des données DDPP. En fonction des niveaux d'industrialisation et d'émissions de GES, elle a dégagé quatre groupes de pays dont elle a étudié chaque trajectoire du point de vue de leur **potentiel d'abattement**⁵. L'analyse livre des résultats encourageants à l'horizon 2050, avec une réduction d'un facteur 2 des émissions de CO₂. Elle révèle également une convergence inédite : pour parvenir à l'objectif des 2 °C, les mix énergétiques moyens des quatre groupes de pays et le mix énergétique « global » se composent à environ 55 % d'énergies renouvelables, et 20 % d'énergie nucléaire (contre moins de 10 % actuellement). Cette montée en puissance du nucléaire reste logique, tel que l'explique Christophe Béhar, directeur du CEA-DEN : « actuellement, seuls six pays égalent voire dépassent les préconisations du Giec pour leur mix énergétique (80 % d'électricité bas carbone) et quatre d'entre eux (Suisse, Suède, France et Brésil) ont un parc électronucléaire ». En effet, selon l'AIE, l'énergie nucléaire a permis d'éviter depuis 1971 l'équivalent de deux années d'émissions de CO₂ au plan mondial, ce qui est, à ce jour, la contribution la plus importante des énergies bas carbone⁶. Cette réalité a d'ailleurs conduit la Société française

L'objectif des 2°C va nécessiter la transformation profonde des systèmes énergétiques

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, directeur du CEA-I-Tésé

Potentiel d'abattement

Baisse des émissions de CO₂ générées par le recours à une technologie.

Diversités énergétiques

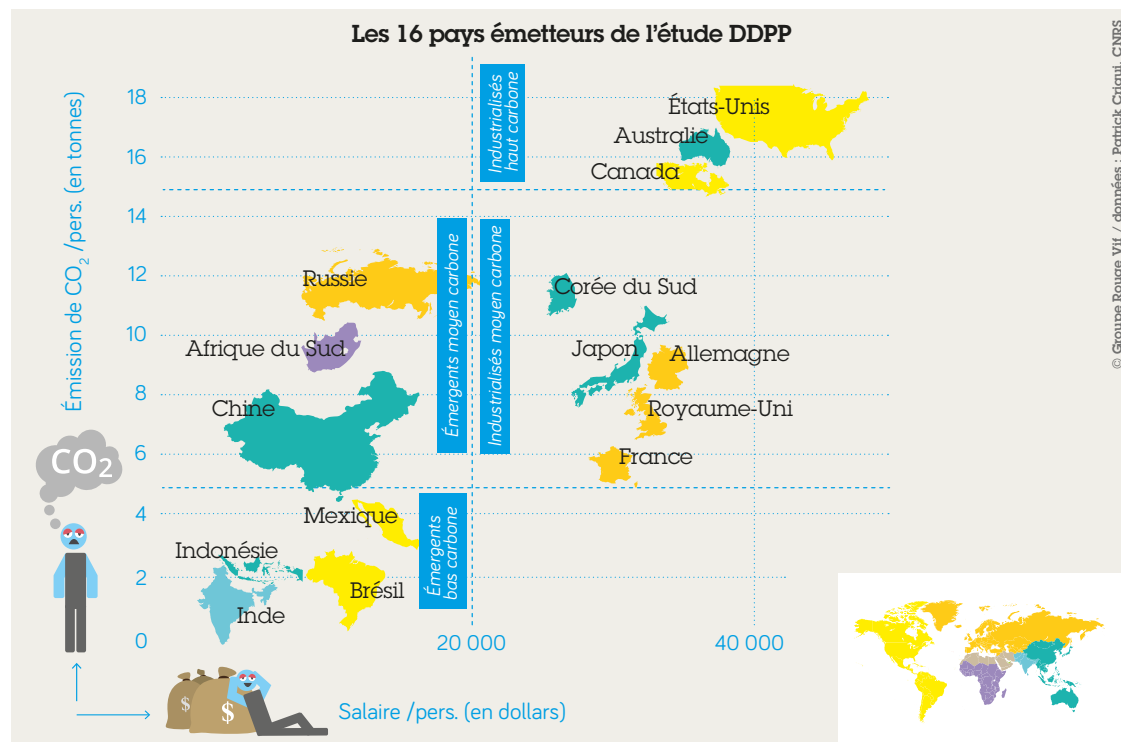
« L'objectif des 2 °C va nécessiter la transformation profonde des systèmes énergétiques » prévient d'emblée Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, directeur du CEA-I-Tésé. Mais comment penser ces changements, quelles sont les politiques nécessaires, tant au niveau national qu'international ? Pour y répondre, l'institut IDDRI³ et le réseau

de l'énergie nucléaire (SFEN) à initier en 2014 le mouvement international Nuclear for climate change (voir encadré).

Technos en stock

Se pose alors la question des moyens, et de leur disponibilité à l'échelle internationale, de ces trajectoires énergétiques. C'est l'objet de la seconde approche, microscopique, de l'étude DW impliquant de nombreux experts dont ceux du CEA : « 14 familles de leviers technologiques, représentant 25 technologies et 108 technologies élémentaires (voir schéma page suivante) ont été identifiées puis analysées à la lumière de quatre questions : niveau de maturité, potentiel d'abattement, verrous à leur déploiement, et innovations nécessaires. C'était une gageure que de demander à des experts français de se prononcer sur leurs technologies à l'échelle mondiale. Nous sommes parfaitement conscients du biais franco-français de cette approche. Mais c'est une première pierre à l'édifice car pareille étude n'a jamais été menée dans le monde » explique Elisabeth Le Net du CEA-i-Tésé.

Concrètement, les niveaux de maturité ont été estimés selon une méthode couplant l'échelle TRL et une échelle de déploiement sur le marché, selon un pas de 10 ans à l'horizon 2050. Cela permet de constater par exemple que les technologies solaires sont rapidement matures et « déployables », ce qui n'est pas encore le cas du stockage de



l'énergie. Les experts ont ensuite planché sur le potentiel d'abattement des 14 familles technologiques, à partir de données de DDPP selon lesquelles 40 Gt d'émissions de CO₂ sont à éviter pour ne pas dépasser l'objectif 2 °C⁷. Malgré la part d'inconnue relative aux financements disponibles et aux coûts associés, l'étude indique que chaque technologie a un potentiel de baisse. Les verrous de ces 14 familles ont ensuite été hiérarchisés selon 6 catégories : R&D; économique et financière ; régulation (réglementations...) ; ressources et environnement (contraintes environnementales, problématique

des matières premières...) ; sécurité et sûreté ; faisabilité sociotechnique (usages, formation...). Les experts estiment par exemple que le premier verrou au déploiement des technologies solaires en général est relatif à la régulation, celui du stockage d'électricité étant lié à l'absence de modèle économique. Enfin, du point de vue de l'innovation, il s'agissait d'évaluer si les besoins portaient sur des innovations incrémentales ou sur de véritables ruptures à qualifier (économique, technologique, organisationnelle, réglementaire, etc.). Pour reprendre l'exemple du solaire, des ruptures réglementaires et de faisabilité socio-technique ont été identifiées, alors que le stockage est confronté à des ruptures technologiques (notamment pour en diminuer les coûts).

« L'étude montre que la communauté internationale a la capacité de développer les technologies et les moyens de production nécessaires d'ici 2050. Mais il faut, dès aujourd'hui, accélérer très fortement l'innovation (y compris en termes de réglementation, de politiques publiques) pour que ces technologies puissent se déployer à partir de 2025-2030. La COP 21 doit contribuer à fluidifier ces circuits et lever ces verrous » résume Jean-Guy Devezeaux de Lavergne. ♦♦♦

Note :
7. D'autres estimations dont celles de l'AIE portent sur « 40 à 50 Gt de CO₂ ».

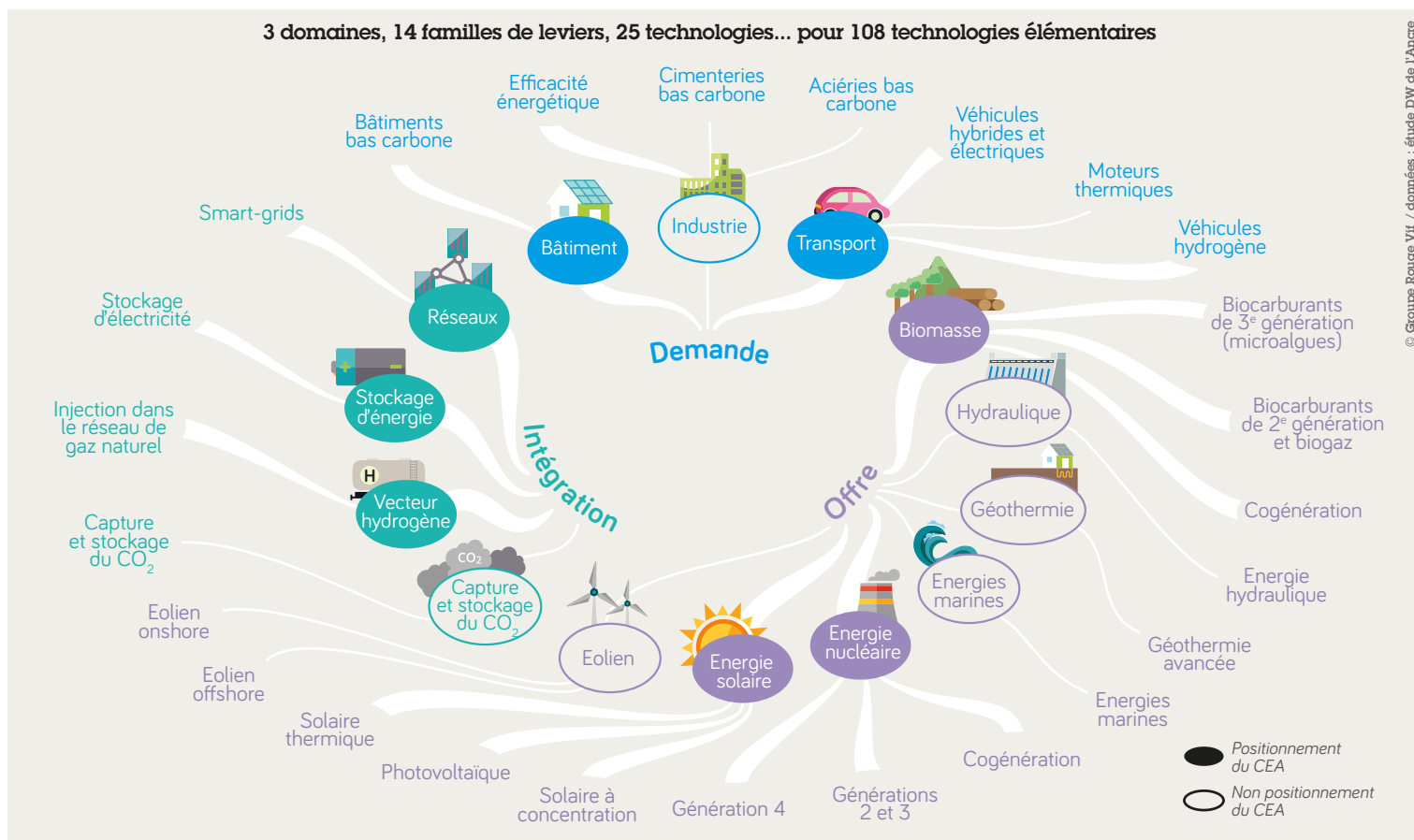
Échelle TRL

Échelle évaluant le niveau de maturité d'une technologie, depuis le principe de base jusqu'au déploiement.

Nuclear for climate Change

En mai 2015, à l'appel de la SFEN, 40 associations scientifiques de l'énergie nucléaire ont signé un manifeste présentant leur engagement dans la lutte contre le changement climatique.

Aujourd'hui, il regroupe plus de 50 000 professionnels du nucléaire (scientifiques, industriels) de pays développés ou en développement sur 5 continents, qui réaffirment l'indispensable contribution du nucléaire aux enjeux de la COP 21. « Par sa dimension internationale et sa diversité, cette initiative est une première » souligne Christophe Béhar, directeur de CEA-DEN et Président de la SFEN.



Des pailles aux territoires

Dans ce contexte, le CEA poursuit sa R&D sur les énergies bas carbone, à commencer par l'énergie nucléaire. Sur le moyen terme, il s'agit d'optimiser le parc actuel de réacteurs, avec des enjeux en termes de durée d'exploitation, de performance, de disponibilité et

rappelle Christophe Béhar. « Les défis portent autant sur les réacteurs que sur le cycle du combustible associé, avec un impératif de soutenabilité. Il s'agit de mettre en œuvre les principes d'économie des ressources et de recyclage des matières dans un souci à la fois économique et environnemental ce qui

participons au projet IGC maison 100 % solaire qui sera présenté à la COP 21 par le ministère de l'Environnement. De même, en réponse à un appel à manifestations d'intérêt (AMI), le CEA-Liten s'est associé à des partenaires publics-privés pour déposer un projet baptisé Campus Smart-Grid Auvergne-Rhône-Alpes, dont l'objectif est de tester le fonctionnement de réseaux avec des sources photovoltaïques, hydrauliques, des moyens de stockage, et des utilisateurs/producteurs comme des bâtiments et véhicules électriques. » annonce Hélène Burlet. Et ce, sans parler du projet de mobilité durable Hyway déployé à Lyon et Grenoble, ou du laboratoire des Énergies du Sud Rhône-Alpes à Montélimar. Des projets, parmi tant d'autres, qui font du CEA un acteur très impliqué dans le déploiement des Territoires à énergie positive (TEPOS) de la loi TECV.

Autant d'exemples qui montrent que la transition énergétique demande de combiner les technologies et d'identifier leurs complémentarités et synergies selon une approche système... ♦

Matières critiques

Matériaux d'accès potentiellement à risques (en raison de leur coût, leur disponibilité dans le sol, la situation quasi-monopolistique des pays producteurs) comme le platine des piles à combustible, le lithium des batteries, les terres rares des aimants permanents.

L'étude montre que la communauté internationale a la capacité de développer les technologies et les moyens de production nécessaires d'ici 2050

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, directeur du CEA-I-Tésé

de sûreté et l'optimisation du parc actuel de réacteurs. Sur le long terme, le CEA prépare la quatrième génération de réacteurs, autour du projet de démonstrateur technologique Astrid, actuellement en phase d'études. « L'avenir du nucléaire passe par l'innovation. Les systèmes nucléaires du futur seront en rupture technologique forte, en particulier en termes de sûreté »

conduit à mettre la priorité sur les réacteurs à neutrons rapides. » Concernant les NTE, les enjeux sont nombreux : diminution des coûts, prolongation des durées de vie, augmentation des performances, limitation du recours aux **matières critiques**. Mais les efforts des équipes sont payants, à en juger les démonstrateurs grandeur nature qui voient le jour. « Nous

www

Ancre

www.allianceenergie.fr

DDPP

www.iddri.org/Projets/The-Deep-Decarbonization-Pathway-Project

SFEN

www.sfen.org/fr/nuclear-for-climate

Sciences du climat

Quand l'ambrosie s'épanouit, les allergies aussi !

Rhinites, conjonctivites, trachéites, crises d'asthme... Telles sont les pathologies provoquées par l'allergie à *Ambrosia artemisiifolia*, plante qui a déjà colonisé, en France, la Bourgogne, l'Auvergne et la région Rhône-Alpes. Or, comme l'indique l'étude ATOPICA¹ impliquant le LSCE, les concentrations dans l'air du pollen de l'ambrosie pourraient quadrupler en Europe d'ici 2050. Le changement climatique serait responsable des deux tiers de cette hausse, permettant à la plante de s'épanouir sur de nouveaux territoires (Nord et nord-est de l'Europe) via différents phénomènes de dispersion des graines. De même, l'augmentation des concentrations en CO₂ de l'atmosphère a un effet favorable au développement de la végétation. Ces tendances prédictives ont été obtenues grâce à plusieurs types de modèles numériques. AG

Note :
1. CNRS, CEA, INERIS, RNSA et plusieurs instituts européens.



© Icelandimages

Sciences du climat

Les volcans acteurs du climat

Dendro-climatologie

Science basée sur l'analyse des cernes de croissance des arbres.

Note :

1. Deux éruptions qui ont injecté le plus de poussières volcaniques dans l'atmosphère au cours du dernier millénaire, respectivement en 1257 et 1815.

Deux approches d'évaluation du refroidissement climatique lié au volcanisme se réconcilient ! Jusqu'ici contradictoires, la **dendroclimatologie** et la simulation numérique présentent désormais des résultats convergents sur l'intensité (de 0,8 à 1,3 °C) et la durée (2 à 3 ans) du refroidissement lié aux éruptions Tambora et Samalas¹. Pour parvenir à ces résultats, la première approche a davantage considéré la densité des cernes des arbres. La seconde a utilisé un modèle climatique comprenant un module microphysique pouvant simuler le cycle de vie des aérosols volcaniques. « Ces améliorations ouvrent la voie à une meilleure évaluation du rôle du volcanisme dans l'évolution du climat » conclut Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue CEA au LSCE qui a participé à l'étude internationale. AL

Démantèlement nucléaire

Maestro passe à la vitesse supérieure !

Évaluation grandeur nature pour Maestro, sur un chantier pilote haute activité de démantèlement du CEA à Marcoule. Développé par le CEA et la société Cybernétix, Maestro est le système robotique téléopéré dédié aux interventions en milieu hostile. « Par la dextérité de son bras "esclave" à retour d'effort, ses fonctions embarquées et ses différents outils interchangeable (scie, gamma caméra...), il permet aux opérateurs d'intervenir à distance dans des conditions extrêmes, comme celles des **cellules chaudes** » expliquent Jean-Michel Bart et Cyril Moitrier en charge du projet. Par ce premier chantier, les performances industrielles de Maestro seront confirmées, en préparation des futurs enjeux de démantèlement. Il sera par ailleurs utilisé sur l'usine UP1 de Marcoule en fin d'année et intéresse déjà le Japon pour la reprise des débris de combustibles à Fukushima Daiichi. AL

Cellule chaude

Enceinte blindée destinée au traitement de matières radioactives.



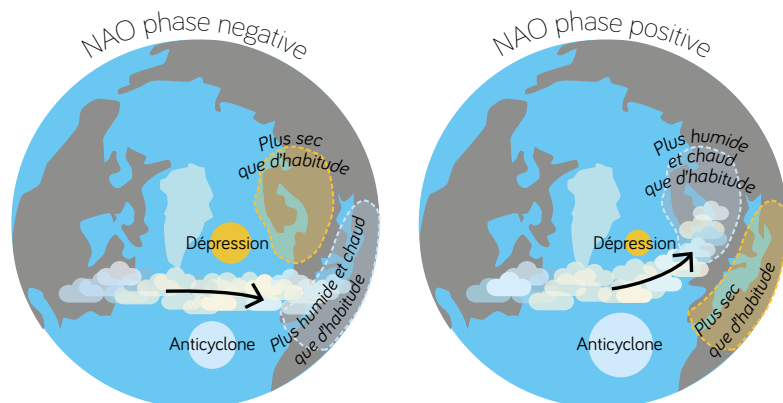
© CEA

Sciences du climat

Prédire le temps avec NAO

Mille ans d'évolution de la circulation atmosphérique hivernale autour de l'océan Atlantique Nord ont été décryptés année après année, par une équipe internationale comprenant des chercheurs du LSCE. Une telle finesse n'avait jamais été atteinte dans l'étude de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) ! Mais pourquoi s'y intéresser ? La NAO est définie par les changements de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. La prévoir permettrait d'anticiper les conditions climatiques hivernales de l'Europe. « Dans cette étude, nous avons utilisé des informations sur les variations climatiques passées dans différentes régions pour estimer sa variabilité » précise Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au CEA.

La nouvelle estimation ne montre pas de **NAO positive** persistante pendant la période médiévale, comme cela avait été suggéré pour expliquer la douceur du climat européen au début du dernier millénaire, mais des phases positives prédominantes aux XIII^e et XIV^e siècles. Par ailleurs, une réponse quasi-systématique de la NAO pendant les années suivant les éruptions volcaniques majeures a été identifiée. AL



NAO positive

Différence de pression atmosphérique entre les Açores et l'Islande plus forte que la moyenne. La trajectoire des tempêtes se déplace alors vers le Nord de l'Europe.

Note:

1. Megaviridae (2003), Pandoraviridae (2013), Pithovirus (2014).

Permafrost

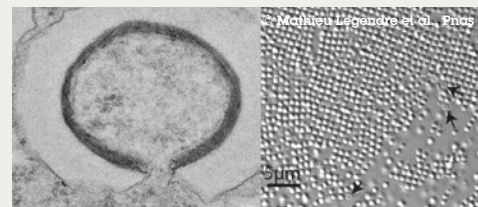
Couche de sol gelée en permanence des régions arctiques, aussi appelée « pergélisol ».

Omiques

Techniques de génomique, transcriptomique, protéomique et métagénomique.

Virologie

Des géants endormis sous les glaces de Sibérie



Et de quatre ! Un nouveau type de virus géant¹ est observé pour la première fois par une collaboration française impliquant le CEA-IG et le CEA-IRTSV. Baptisé Mollivirus sibericum, il a été isolé à partir d'un échantillon de **permafrost** sibérien datant de 30 000 ans, et a pu infecter une culture d'amibes, organismes unicellulaires classiquement utilisés comme hôtes pour l'étude des virus géants. Son étude, par utilisation simultanée de toutes les techniques « **omiques** » d'analyse du vivant à haut débit, a permis de mieux comprendre sa structure et l'orchestration moléculaire de son cycle infectieux. Cette découverte suggère la capacité de virus, certains potentiellement pathogènes, à survivre dans le permafrost durant de très longues périodes. Et soulève une question de santé publique, liée au changement climatique qui facilite l'accès à ces zones, jadis désertiques, en vue des exploitations minière et pétrolière. AL

Note:

1. Projet européen Refreepermag, avec CRS, Université Paris-Diderot et Insa de Toulouse.

Coercivité

Propriété désignant l'intensité du champ magnétique à appliquer à un matériau pour annuler son aimantation.

Matériaux

Cobalt : métal « précieux » pour aimants permanents

Les aimants permanents sont omniprésents dans les objets technologiques, y compris les véhicules électriques et éoliennes. Or, 65 % contiennent des terres rares, essentiellement du néodyme, dont la production quasi-monopolistique de la Chine et l'accroissement de la demande entraîne une flambée des prix. Motivés par l'union européenne, les chercheurs explorent des voies de substitution. À l'instar de ceux du CEA-Iramis¹ qui sont parvenus à concevoir des aimants permanents à base de cobalt.

Comme son nom l'indique, un aimant « permanent » conserve son état magnétique, grâce à sa **coercivité** : plus celle-ci est élevée, plus il faudra un champ magnétique élevé pour changer l'état magnétique. Par exemple, le néodyme peut « résister » jusqu'à 1 Tesla, soit environ 10 000 fois celui de la Terre. « Pour rendre coercitif du cobalt, nous avons réalisé des nanofils de cobalt cristallin de grande longueur (200 nm) et de faible diamètre (8 nm) et nous les avons alignés » indique Frédéric Ott du CEA-Iramis. Si la performance du cobalt atteint 60 % de celle du néodyme, les nano-aimants ont une meilleure tenue en température (jusqu'à 250 °C, contre 160 °C pour le néodyme), leur extraction minière est bien moins polluante, et ils permettent des applications miniaturisées. AG



© D. Guillaud / CEA



Sciences du climat

Le printemps résiste au changement

L'apparition des feuilles au printemps est plus résistante au réchauffement climatique qu'on ne le pensait. C'est ce que démontre une équipe du **LSCE**. « Le verdissement est fortement corrélé aux températures : plus elles sont chaudes, plus cette étape est précoce » rappelle Marc Peaucelle, doctorant au LSCE. Or, en étudiant 1 245 forêts européennes, les scientifiques ont observé que le décalage du verdissement était moins rapide entre 1999 et 2013 (2 jours par degré de réchauffement), qu'entre 1980 et 1994 (4 jours par degré). Ce ralentissement de l'apparition des feuilles modère ainsi la prédiction d'un fort allongement de la saison de croissance de la végétation sous l'effet du réchauffement à venir. Ce résultat aura probablement un impact sur le cycle du carbone, le cycle de l'eau, ou encore la résistance des arbres aux froids extrêmes : « le retard de l'arrivée des feuilles va les protéger du gel » précise le chercheur. **AL**

Note :

1. Projet 100 % solaire, avec le constructeur de maisons IGC

Efficacité énergétique

Chaud-froid dans les briques

Pourquoi recourir à l'électricité pour climatiser une maison, alors que de simples échanges thermiques peuvent fournir le même confort, sans impact sur la facture énergétique ou le bilan carbone ? Une question de bon sens qui a conduit des chercheurs à breveter un système original de rafraîchissement, validé sur un chantier expérimental à Bordeaux dans le cadre d'un projet de maison autonome en énergie¹.

Son principe repose sur des murs en briques creuses qui communiquent avec un réservoir d'eau placé sous la maison :

« La nuit, l'eau se rafraîchit dans les briques par convection, rayonnement et évaporation. Le jour, elle est envoyée dans les tuyaux du plancher pour rafraîchir l'air ambiant ; en fin de journée, devenue chaude, elle repasse dans les briques pour un nouveau cycle » explique Etienne Wurtz du **CEA-Liten**.

En plus de la conception du système, les experts ont développé le logiciel qui pilote la climatisation en fonction de prédictions météorologiques. Ils planchent à présent sur un système de réchauffement à moindre coût pour l'hiver. **AG**



Chimie organique

Du bois dans le plastique

Comment réduire la part des hydrocarbures dans la fabrication des matières premières plastiques, des solvants ou des cosmétiques ? Une équipe du **CEA-Iramis** a travaillé sur le « recyclage chimique » de la **lignine** en vue de produire un substitut durable de ces composés à partir de déchets forestiers. Plus particulièrement, elle a développé un procédé de dépolymérisation de ce composant du bois en utilisant des molécules stables et non-toxiques. « Aujourd'hui la lignine est peu valorisée alors qu'elle représente un gisement annuel de plus d'un million de tonnes » précise Thibault Cantat, chercheur au CEA-Iramis. À température et pression ambiantes, ce procédé a permis d'obtenir des produits aromatiques entrant dans la fabrication des plastiques, d'additifs ou des cosmétiques ; et ce à partir de nombreuses espèces de bois différentes. **AL**

Lignine

Composant représentant 30 % de la masse du bois



CEA-Leti

Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information

CEA-Liten

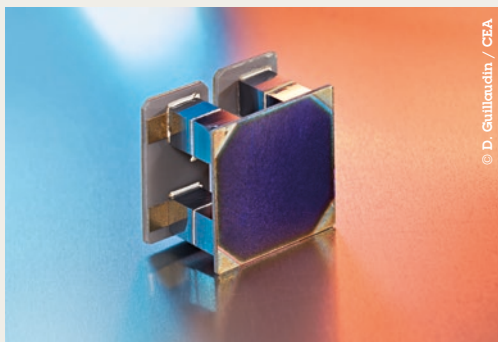
Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles

Efficacité énergétique

Gestion à la carte du confort thermique

Connecter le chauffage électrique de son domicile aux informations du réseau ERDF, pour profiter des opportunités tarifaires tout en optimisant son confort: c'est ce que propose une équipe **CEA-Leti** grâce à une carte électronique dédiée, intégrant un microcontrôleur, et pilotée par une application smartphone. Son mode opératoire: récupération des informations du réseau (heures creuses/heures pleines, courbes de charge, annonces éventuelles de délestage...); prise en compte, par apprentissage, des habitudes des occupants; puis transmission au chauffage, via le fil pilote, de différents ordres (hors gel, économique, confort ou arrêt). À terme, la carte pourra également piloter d'autres fonctions comme l'éclairage, les volets roulants, etc. Développée grâce à l'IRT Nanoélec, cette solution peut être intégrée à un réseau de type smartgrid et intéresse déjà des industriels. AG

Récupération d'énergie



© D. Guillaudin / CEA

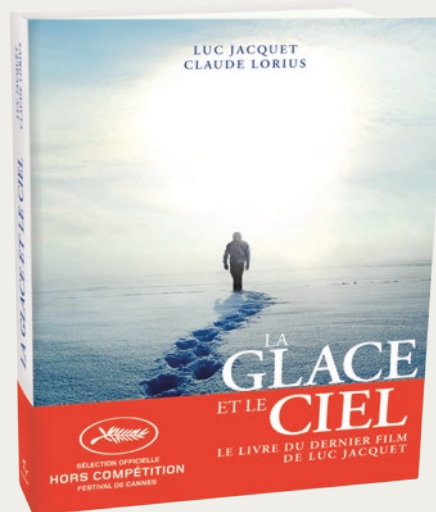
Des moteurs dopés à la chaleur

35 à 40 %: c'est le rendement maximum d'un moteur thermique automobile. Alors, pour valoriser l'énergie perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement, rien de tel que la thermoélectricité. Pour cela, une équipe du **CEA-Liten** propose des semi-conducteurs thermoélectriques à partir d'un matériau à base de silicium, abondant et non toxique. Réalisés avec Valéo et HotBlock OnBoard, ils ont permis de récupérer 400 W électrique¹.

Grâce à la plateforme « thermoélectricité » de CEA Tech, des volumes de production quasi-industriels (plus de 2000 pièces) ont pu être atteints, de façon reproductible. De quoi se positionner sur le marché exigeant mais gigantesque de l'automobile. AG

Note:

¹. dans le cadre du FUI RENOTER2.



AU CŒUR DU CONTINENT BLANC

La glace et le ciel
Luc Jacquet et Claude Lorius.
Éditions Paulsen.
39,50 €

1955, Claude Lorius part pour un hivernage d'un an en Antarctique, sans possibilité de retour ou d'assistance. Une expérience qui a changé sa vie, notamment lorsque le jeune homme découvre que chaque bulle d'air enserrée par les glaces des pôles est un échantillon de l'atmosphère de l'époque où elle fut emprisonnée...

« Aujourd'hui encore, je suis stupéfait de voir l'impact qu'ont pu avoir nos découvertes » raconte Claude

Lorius du haut de ses 83 printemps. Cette vie hors norme de 40 années d'expéditions polaires est au cœur du dernier film de Luc Jacquet et est également racontée dans ce beau livre illustré. Une seconde partie, écrite entre autres par Gilles Ramstein, climatologue au CEA, raconte l'histoire de notre planète afin de mieux comprendre le subtil équilibre dont nous dépendons.

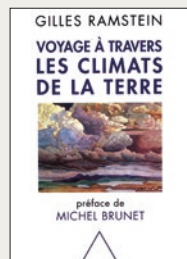


Abonnement gratuit

Vous pouvez vous abonner sur:

<http://cea.fr/defis> ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse et profession à **Les Défis du CEA - Abonnements. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.**

COMPRENDRE LES CLIMATS PASSÉS POUR CONSTRUIRE L'AVENIR



Quels ont été les différents climats de l'histoire de la Terre ? Comment s'est organisée l'alternance des périodes froides et chaudes ? Quelles leçons en tirer pour mieux comprendre le réchauffement climatique actuel ? Gilles Ramstein, climatologue et directeur de recherches au CEA, analyse ces extraordinaires variations du climat terrestre depuis 4 milliards d'années. Un voyage préhistorique pour comprendre les dérèglements actuels de notre Planète et dessiner son avenir.

Voyage à travers les climats de la Terre.
Gilles Ramstein. Odile Jacob. 24,90 €

UN DESSIN PLUTÔT QU'UN LONG DISCOURS

Le changement climatique, en BD !
Yoram Baurman et Grady Klein
Éditions Eyrolles. 18 €



L'AVENIR DU CAPITALISME

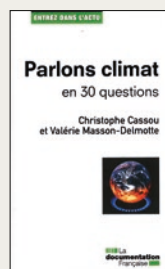


La réponse des économistes au changement climatique s'articule autour du « prix du carbone ». C'est du bon sens, mais c'est une révolution. De Jean Tirole à Michel Rocard, les auteurs rassemblés dans cet ouvrage mettent ainsi en lumière les choix économiques fondamentaux qui sont proposés, les aléas des processus de décisions politiques, la tension entre coopération internationale et intérêts nationaux. Mais le capitalisme peut-il réellement changer ?

Le climat va-t-il changer le capitalisme ?
Sous la direction de Jacques Mistral.
Éditions Eyrolles. 17 €



LE CLIMAT ?



Que sait-on exactement du fonctionnement du climat ? Qu'est-ce qu'un modèle climatique ? Quels sont les changements observés depuis 1900 ?... Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au CEA, et Christophe Cassou du CNRS se sont prêtés à l'exercice d'expliquer le climat en 30 questions/réponses. Une façon pour le lecteur de sortir du brouhaha médiatique en accédant à des informations objectives, factuelles et concises sur le climat et ses variations.

Parlons climat en 30 questions.
Christophe Cassou et Valérie Masson-Delmotte.
Éditions La documentation. 5,90 €

Webdocumentaire

« Paroles de climatologues »

Comme les climatologues, jouez au détective pour reconstituer les climats passés en relevant des indices sur tous les échantillons que vous aurez prélevés sur Terre et dans l'atmosphère. D'études en hypothèses, d'analyses en simulations, l'exploration de chaque milieu vous permettra de remonter dans le temps, mais aussi de vous projeter dans l'avenir ! Par ailleurs, ce webdocumentaire propose des interviews, vidéos, animations et diaporamas pour présenter le travail des chercheurs sur le terrain et au laboratoire.

<http://cea.fr/webdoc-climat>

L'EXPÉRIENCE CLIMAT

▷ INSPIREZ EXPLOREZ ◁
VOUS ÊTES AU GRAND PALAIS

**DU 4 AU 10
DÉCEMBRE 2015**

Le CEA sera présent
au Grand Palais,
du 4 au 11 décembre.
Il participera
à 3 conférences:
transports durables;
mix énergétique;
évolution des milieux
naturels et maladies
émergentes.

► PENDANT LA CONFÉRENCE MONDIALE SUR LE CLIMAT (COP 21) À PARIS EN DÉCEMBRE 2015, VENEZ AU GRAND PALAIS RENCONTRER ARTISTES, ASSOCIATIONS, ENTREPRISES, ONG, SCIENTIFIQUES, VILLES ET TERRITOIRES, ET PARTAGER DES SOLUTIONS INNOVANTES POUR LUTTER CONTRE LE DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE.