les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

224
février 2018

TOUT S'EXPLIQUE

Supplément détachable **sur la fusion nucléaire par confinement magnétique**

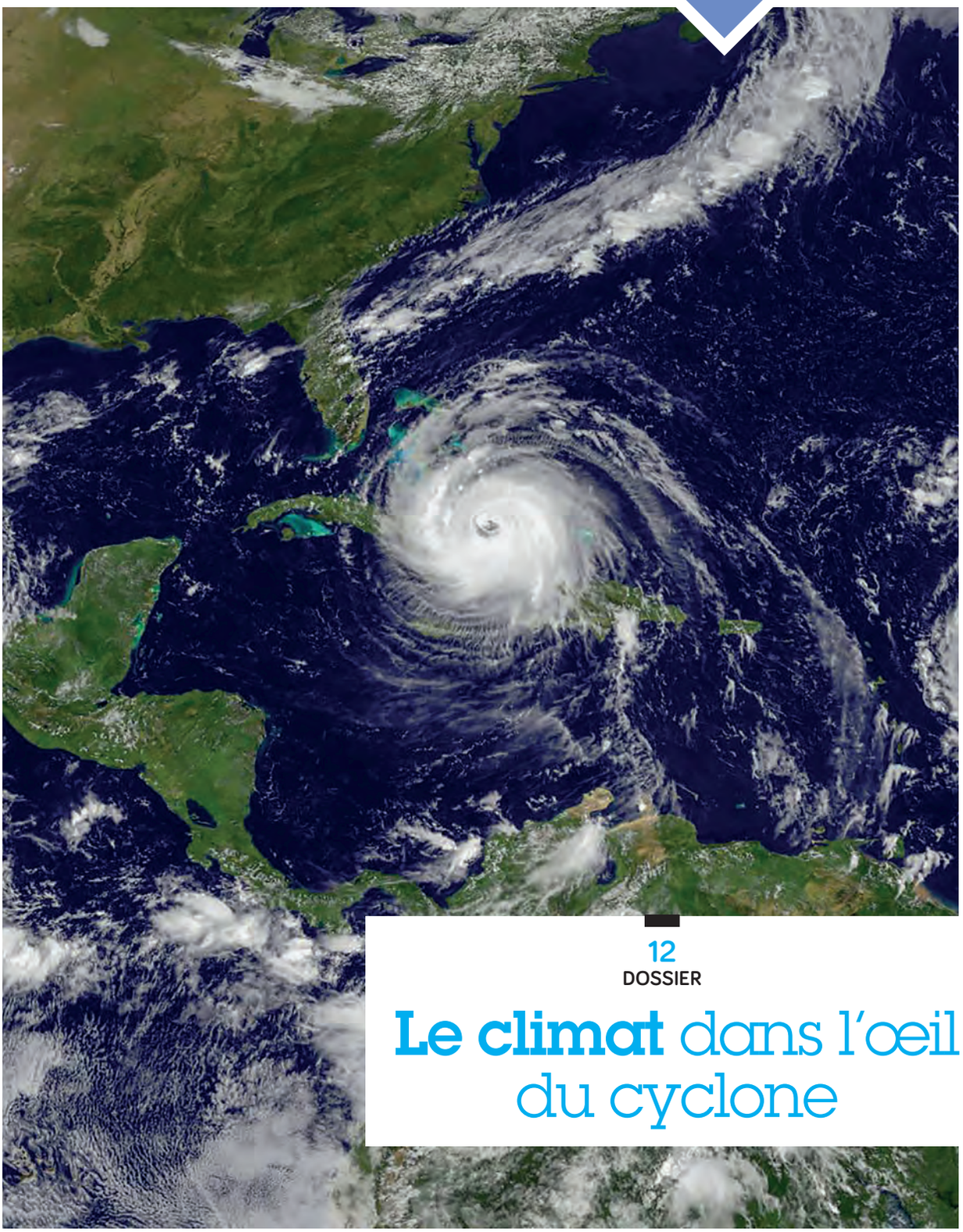
02
L'INTERVIEW
◆ Quand un physicien statisticien explore, avec un biologiste moléculaire, les mouvements collectifs de la matière... ◆

04
ACTUALITÉ
◆ Avec Additive Factory Hub, la fabrication additive prépare l'industrie de demain ◆ Le CEA, le CNRS et Protec Industrie unissent leurs forces dans la chimie verte ◆ L'Alliance solaire internationale à l'Ines ◆ Un Mooc pour débattre de la place du nucléaire en France ! ◆ Les neurosciences à l'Education Nationale ◆ Icos certifie ses premières stations ◆ De meilleures méthodes de suivi des GES avec Trace ◆

06
SUR LE VIF
◆ Tera 1000-2 : mise en service ! ◆ Premier plasma en point X pour West ◆ Le CEA et ses start-up s'affichent à Las Vegas ◆

20
SCIENCES EN BREF
◆ Dans le bon champ de vision des bébés ◆ Les empreintes digitales passées au crible ◆ Des nanofeuillets de graphène pour des supercondensateurs ◆ Le « couper-coller » de la chimie ◆ Corriger les circuits intégrés dans l'espace ◆ Du nouveau dans la stratégie antibiotique ◆ Comment le conscient et l'inconscient travaillent de concert ◆ La composition chimique des batteries observée en fonctionnement ◆

23
KIOSQUE



12
DOSSIER
Le climat dans l'œil du cyclone

HUGUES CHATÉ,
Physicien statisticien du CEA-Iramis

MANUEL THÉRY,
Directeur de recherche en biologie cellulaire au CEA-Big

© CEA

Explorer les mouvements collectifs de la matière

Très occupés par leurs recherches respectives au CEA et à l'international[1], ils ont pourtant trouvé le temps de faire un point sur leur projet *Contract*. Depuis 2017, dans le cadre de DRF Impulsion, Hugues Chaté développe des modèles pour simuler les expériences de Manuel Théry et Laurent Blanchoin[2]. Enjeu : chercher à déterminer les propriétés des mouvements collectifs de la matière active, qu'elle soit inerte ou vivante. Rencontre.

Propos recueillis par Aude Ganier

Qui est allé chercher qui pour conduire des recherches communes, dans le cadre des appels à projet « DRF Impulsion » du CEA ?

Hugues Chaté : Nous autres physiciens travaillons sur la matière active. Nous nous intéressons aux propriétés collectives des choses qui se déplacent ou qui sont déplacées par d'autres : une matière active dont l'énergie est dépensée au niveau des petites unités qui la composent. Cela a naturellement beaucoup de liens avec la biophysique !
Les recherches sur la matière active demeurent largement théoriques, car il est très difficile de contrôler des expériences et de prendre des données. Imaginez, comment suivre les déplacements individuels dans un banc de sardines ? Certes, les physiciens expérimentent par exemple des particules granulaires vibrées, mais en nombre réduit car cela nécessite des plateaux vibrants trop grands et compliqués à contrôler. Les biologistes, eux, parviennent aujourd'hui à manipuler des millions « d'individus ».

Manuel Théry, vous qui travaillez avec Laurent Blanchoin sur des réseaux de protéines, avez donc apporté à Hugues Chaté des millions d'objets vivants dont vous connaissez les mécanismes ?

Manuel Théry : Disons que nous connaissons les règles macroscopiques qui déterminent la capacité d'un réseau de filament à s'étendre ou se contracter. Mais nous ne connaissons pas les mécanismes à l'échelle des molécules, ni même des filaments. Depuis ces cinquante dernières années, on connaît la fonction de protéines *in vivo*, intuitée du fait que lorsqu'on éteint leur expression, il se passe quelque chose. Mais plus récemment, des approches inversées et complémentaires permettent de tester directement la fonction des protéines en les purifiant et en les ajoutant à un réseau de filaments *in vitro*, en dehors de tout contexte cellulaire. Cela nécessite l'expertise de biochimistes comme Laurent Blanchoin qui sait purifier n'importe quelle protéine, l'isoler, l'extraire et la mettre en présence d'autres protéines pour comprendre leurs interactions. L'utilisation des techniques de microfabrication associées à la biochimie permet d'étudier les propriétés d'auto-organisation des filaments dans des conditions contrôlées et reproductibles. À l'époque, je travaillais sur les cellules : en construisant des carrés ou des triangles à l'échelle microscopique, j'ai découvert que la cellule ressentait son environnement géométrique, en adaptant son architecture interne à ces formes. Avec Laurent, nous avons eu l'idée d'utiliser ces mêmes supports microfabriqués pour greffer des protéines à des endroits précis et étudier l'impact de ces géométries sur la croissance et l'alignement des filaments.

En quoi consiste le projet *Contract* ?

M.T. : Au départ, je me suis aperçu que les cellules s'assemblaient dans ces formes géométriques selon des architectures assez reproductibles.

Notes :
1. Hugues Chaté collabore avec de nombreuses équipes, en Chine, au Japon ; quant à Manuel Théry, il commence notamment un second projet ERC.
2. Biochimiste co-initiateur du projet *Contract*.

Et lorsque nous avons commencé, avec Laurent, à mettre des protéines capables de nucléer des filaments, nous avons vu qu'ils poussaient de manière également reproductible ! Ce qui laissait supposer que tout cela était déterminé. Je voulais identifier ces lois, tout comme Hugues Chaté dont le sujet est précisément d'étudier et de formuler des lois sur l'auto-organisation de la matière active.

H.C. : L'enjeu de *Contract* est de construire un modèle pour simuler ce que Manuel et Laurent ont vérifié expérimentalement. Par exemple, avec des filaments d'actine (constituant essentiel du cytosquelette des cellules eucaryotes) et des myosines (protéines moteur des actines). Une de leurs expériences consistait à ne laisser les filaments d'actine « brancher » lors de leur croissance qu'en des régions prédéterminées. L'action des myosines dépend alors de la forme et de la taille de ces réseaux. Grâce à DRF Impulsion, nous avons pu recruter un chercheur, Xiaqing Shi, qui se consacre à plein temps pour un an sur notre projet. Nous avons construit un modèle mécanistique où les filaments d'actine sont constitués de petits bâtonnets articulés entre eux, le long desquels des paires de myosines peuvent se déplacer.

M.T. : Ce ne sont pas les premiers à essayer de simuler cela. Mais beaucoup d'équipes ont abandonné car c'est très compliqué à modéliser. Les très petites échelles de représentations supposent beaucoup de bâtonnets pour faire un filament. Et chaque filament fluctue au cours du temps, pouvant générer d'autres filaments, si bien que le nombre de bâtonnets croît de manière exponentielle, limitant le nombre de filaments que l'on peut étudier. Quand nous avons commencé ce projet, en juillet 2017, nos expériences étaient « en avance ». Mais, depuis le mois d'octobre, Hugues et Xiaqing nous ont complètement dépassés !

H.C. : Disons que nous avons été un peu plus malins que la compétition ! Nous sommes deux ordres de grandeur plus rapide, avec des dizaines de milliers de bâtonnets et de moteurs moléculaires (myosine). Nous pouvons viser le million avec notre modèle, mais ce n'est pas l'objectif : nous voulons comprendre…

Quelle suite allez-vous donner ?

H.C. : Le projet consistait à simuler, pour mieux les comprendre, un jeu d'expériences. Nous n'avons pas encore terminé car nous sommes tellement tentés par toutes les possibilités d'investigation qui s'offrent à nous !
À présent, nous pouvons espérer modéliser la dynamique de ce type d'architecture dans une cellule. Car là, nous restons dans un système *in vitro*. Nous pourrions avoir un nombre de composants et de filaments plus crédible pour parvenir à un meilleur niveau de complexité.

M.T. : Nous avons une boîte à outils incroyable, pour vérifier de nombreuses choses. L'une des questions est de savoir pourquoi la biologie a sélectionné, ensemble, deux types de **nucléations** : un qui est local et dense ; l'autre qui est très rapide et très étendu. Et cette combinaison, nous pourrons sans doute la comprendre grâce à la simulation.

H.C. : Absolument ! La simulation permet évidemment une versalité et un « contrôle » total sur les filaments et les moteurs, ce que ne permettent pas les expériences. Du coup, nous pouvons espérer faire des prédictions vérifiables, car les expériences de Manuel et de Laurent sont très bien contrôlées… Un luxe dans le domaine ! ◆

DRF IMPULSION

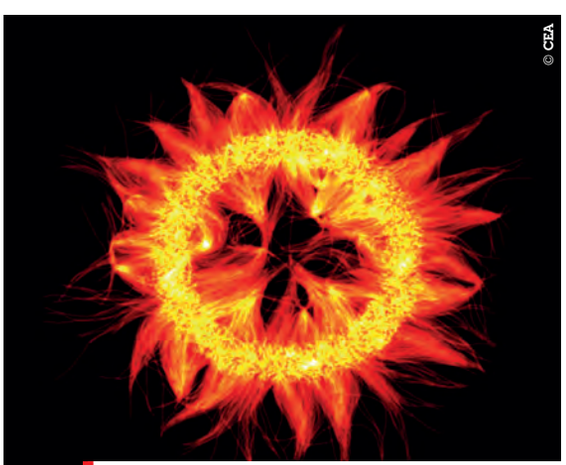
Depuis 2016, la recherche fondamentale du CEA réunit, au sein d'une même direction programmatique, les sciences de la matière et les sciences du vivant. L'occasion d'encourager les transversalités entre les chercheurs, au sein de projets baptisés DRF Impulsion.

La simulation permet une versalité et un « contrôle » total sur les filaments et les moteurs. Nous pouvons espérer faire des prédictions vérifiables, car en plus, les expériences de Manuel et de Laurent sont très bien contrôlées….

Hugues Chaté, Physicien statisticien du CEA-Iramis

Notion clé

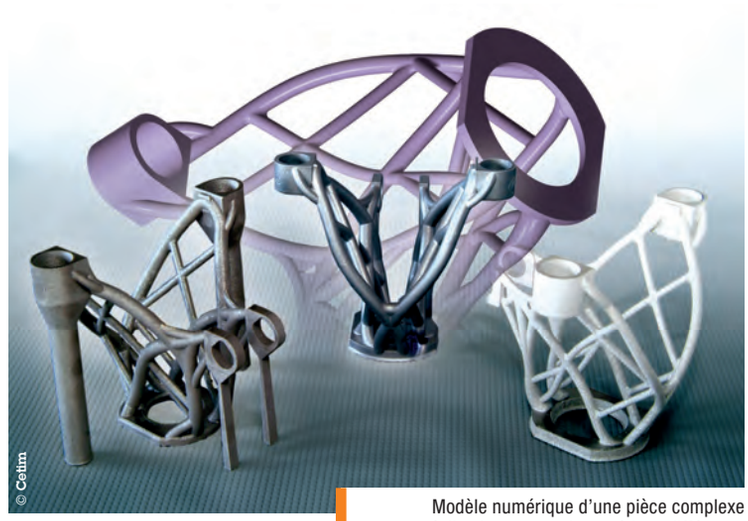
Nucléation
Étape qui produit la structure élémentaire (un mini-filament), capable de déclencher le processus d'élongation du filament (polymérisation).



Filaments d'actine : expérience (à g.) et simulation (à d.).

Écosystème innovant

Avec *Additive Factory Hub*, **la fabrication additive prépare l'industrie de demain**



Modèle numérique d'une pièce complexe et sa réalisation avec trois matériaux différents.

Innover, développer et intégrer la fabrication additive (impression 3D) dans un même lieu : c'est l'ambition de l'initiative *Additive Factory Hub* (AFH), portée par le Cetim et opérée conjointement avec le CEA. Inaugurée en décembre 2017 à Digiteo-Saclay, sur le centre CEA Paris Saclay, la plateforme AFH structurera l'écosystème industriel en fabrication additive autour des acteurs de la recherche du Campus Paris-Saclay et de l'Île-de-France. Objectif : répondre aux enjeux industriels et économiques majeurs qu'elle implique.

Au cœur des mutations des modes de production et de travail de l'industrie du futur, la fabrication revêt une dimension stratégique, bouleversant les enjeux industriels de fabrication et de mise en forme : nouvelles géométries, allègement des matériaux et structures, fonctionnalisations augmentées, personnalisation des pièces, amélioration des performances et de la logistique. Ainsi, conformément à la feuille de route écrite en 2016 par l'Alliance industrie du futur, à laquelle contribue le CEA, *Additive Factory Hub* accueille en un même lieu acteurs de la recherche académique, technologique et de l'industrie, PME, fournisseurs de technologies et utilisateurs finaux.

Un écosystème transdisciplinaire sur toute la chaîne de valeur

Ensemble, les membres d'AFH définissent des programmes mutualisés de R&D, focalisés sur le franchissement de jalons scientifiques et technologiques. Ces programmes vont de la conception et la simulation numérique au développement de procédés de fabrication (instrumentation et optimisation des équipements), jusqu'à la qualification des pièces produites. La complémentarité de tous ces acteurs numériques ouvre la voie à une chaîne numérique complète : design, simulations multi-échelle et multiphysique, pilotage des équipements simulation du contrôle. L'optimisation des techniques de fabrication pourra bénéficier de l'implication de fabricants d'équipements et de pièces, mais également de l'expertise académique et métrologique. Ces développements conjoints permettront à la fois d'améliorer les procédés actuels et de produire des innovations de rupture (application multimatériaux, implantation d'Internet des objets). *AG*

Inauguration en présence de la Présidente de la Région Île-de-France, Valérie Pécresse, aux côtés du directeur du CEA-List, Philippe Watteau.

400 m²
À DIGITEO-SACLAY, SUR LE CENTRE CEA PARIS SACLAY

15
ÉQUIPEMENTS

19
MEMBRES ET PARTENAIRES
Addup, Air Liquide, Framatome (ex Areva NP), Arts et Métiers ParisTech, CEA, Cetim, CNRS, Dassault Systèmes, ENS Paris-Saclay, EDF, LNE, Mines ParisTech, Onera, Poly-Shape, Safran, SystemX, Université Paris-Saclay, Université Paris-Sud, Vallourec.

40 M€
SUR 5 ANS

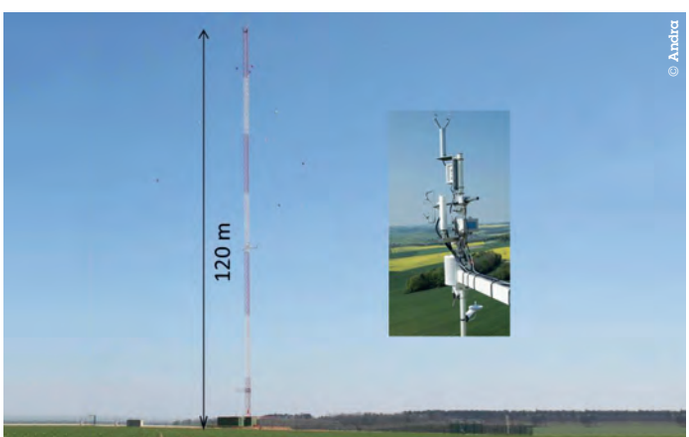
Visite internationale

L'Alliance solaire internationale à l'Ines

Le 14 décembre 2017, Upendra Tripathy, Directeur Général de l'Alliance solaire internationale (ASI), a visité pour la première fois les installations du CEA à l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) à Chambéry. La totalité des activités de l'Institut lui a été présentée, allant des travaux de recherche et développement sur les technologies innovantes à la fabrication de cellules photovoltaïques. Des projets communs sont envisagés dès 2018, comme le co-financement de thèses par les deux organismes. Lancée fin 2015 à l'occasion de la COP 21 par le Premier ministre indien et le Président français, l'Alliance solaire internationale s'applique à rendre l'énergie solaire accessible à tous avec des solutions fiables et abordables. Ouvert à la signature, puis à la ratification, lors de la COP 22, le traité fondateur de l'Alliance vise à rassembler les 121 pays de la zone intertropicale. *SR*

Infrastructure de recherche

Icos certifie ses premières stations



© Andra

L'une des premières stations de mesure de gaz à effet de serre certifiée Icos, située en France. Site de l'Observatoire pérenne de l'environnement (Andra, Meuse).

L'infrastructure de recherche européenne Icos[1], à laquelle contribue le CEA, vient de certifier ses sept premières stations de mesure de gaz à effet de serre en Allemagne, en Belgique, en France, en Finlande et en Italie. À terme, ce réseau devrait disposer de 140 stations certifiées d'ici fin 2019. Les données qu'elles collectent visent à mieux caractériser et quantifier les émissions et les puits de carbone au niveau européen, une information essentielle pour prévoir le changement climatique et en atténuer les conséquences. De son côté, la France prévoit d'ici trois ans de labelliser quatre stations atmosphériques, onze stations de suivi des écosystèmes et une station de mesure des échanges air/mer de CO_2 à bord d'un navire de commerce. *SR*

Note :
1. *Integrated Carbon Observation System.*

© Sfen

Formation

Un Mooc pour débattre de la place du nucléaire en France !

2018 s'annonce comme une année importante pour la filière nucléaire française : la nouvelle orientation du mix électrique sera décidée après un débat public organisé ce premier trimestre, dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).
À cette occasion, la SFEN[1], en partenariat avec l'INSTN[2], lance le premier Mooc *(Massive Open Online Course)* consacré à « L'énergie nucléaire en France ». En libre accès depuis la plateforme officielle de l'enseignement supérieur et de la recherche Fun, il aborde les dimensions économique, environnementale et industrielle de l'énergie nucléaire : énergie de transition ou d'avenir ? pourquoi travailler dans le nucléaire ? d'où vient l'électricité qui nous chauffe et nous éclaire ?... Organisé en deux niveaux, ce Mooc permet d'acquérir une culture générale sur la place de cette filière, et de compléter les connaissances de ceux qui ont suivi une formation nucléaire. À raison de quatre vidéos hebdomadaires de 5 à 10 minutes, il se déroulera sur six semaines jusqu'au 23 mars prochain (*voir page 23*). *AG*

Notes :
1. Société française d'énergie nucléaire.
2. Institut national des sciences et techniques du nucléaire, administré par le CEA.

MOOC « L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN FRANCE »

Début du cours le 5 février 2018
Inscription jusqu'au 16 mars 2018
www.fun-mooc.fr
(voir page 23 de ce numéro)

Jean-Michel Blanquer et Stanislas Dehaene.

Conseil scientifique ministériel

Les neurosciences à l'Éducation nationale

Le Conseil scientifique de l'Éducation nationale est la toute dernière instance créée par Jean-Michel Blanquer, le ministre de l'Éducation nationale. *« Il est essentiel que dans un pays moderne les décisions éducatives soient éclairées par les sciences »,* a expliqué le ministre. À sa tête, Stanislas Dehaene, psychologue et neurobiologiste, professeur au Collège de France et Directeur de Neurospin, le centre d'imagerie cérébrale dédié à l'étude du fonctionnement du cerveau, situé sur le centre CEA Paris-Saclay. Spécialiste reconnu pour ses travaux majeurs sur l'apprentissage de la lecture, des mathématiques, ou encore sur l'origine du langage, il y siégera aux côtés de vingt autres experts, tous de haut niveau – professeurs, spécialistes de l'écrit, du bilinguisme, philosophes, sociologues, linguistes, mathématiciens… Cette assemblée pluridisciplinaire apportera au ministre des éclairages pertinents en matière d'éducation sur de nombreux sujets : méthodes d'apprentissage, manuels scolaires, évaluation des élèves, formation des enseignants… *SR*

Laboratoire commun

Le CEA, le CNRS et Protec Industrie unissent leurs forces dans la chimie verte

Le CEA, le CNRS et le groupe Protec Industrie lancent leur laboratoire commun Mestrel. Objectif : développer un procédé de préparation de surface métallique avant peinture, sans chrome hexavalent. Ce produit chimique, aujourd'hui utilisé pour permettre une bonne adhésion des peintures, sera interdit à partir de 2022, du fait de ses propriétés cancérogène, mutagène et reprotoxique. La nouvelle technologie intéresse les industries aéronautique, *offshore* et du transport. Elle est basée sur le procédé d'électrogreffage SEEP[1] breveté par le CEA, une technique simple qui permet d'obtenir un revêtement adhérant fortement à la pièce, *via* des liaisons chimiques stables. Mestrel devra préparer le passage du laboratoire à l'échelle l'industrielle en préservant les bonnes propriétés de protection contre la corrosion et d'adhérence des peintures. La mise sur le marché est attendue dans 3 à 4 ans. *SR*

Note :
1. *Electroinitiated Emulsion Polymerization.*

Avions à l'atelier de peinture.

Chaire industrielle

De meilleures méthodes de suivi des GES avec Trace

Pour respecter l'accord de Paris, il est indispensable de réduire drastiquement – de moitié tous les 10 ans – les émissions de gaz à effet de serre. Encore faut-il d'abord connaître avec précision et de manière fiable leurs émissions actuelles ! C'est l'enjeu de Trace, la nouvelle chaire industrielle qui vient d'être mise en place à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. Ce programme de recherche, d'une durée de quatre ans, vise à développer de meilleures méthodes de suivi des émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane) par satellite et à l'aide de nouveaux capteurs déployés à proximité de sites émetteurs de méthane. La chaire, coordonnée par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CEA/CNRS/UVSQ) et cofinancée par les industriels Suez, Thales Alenia Space et Total, disposera d'un budget de 1,5 million d'euros. *SR*

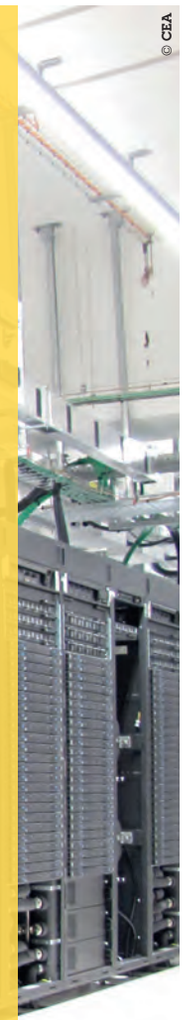
Calcul haute performance

Tera 1000-2 : mise en service !

Tera 1000-2 est désormais opérationnel. Quatrième génération des calculateurs du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA, il préfigure le calculateur de la prochaine décennie, de classe exaflopique[1].

par Sylvie Rivière

Calculateur Tera 1000-2.



© CEA

Fin décembre 2017, les derniers modules de Tera 1000-2 ont été installés et raccordés au réseau classifié de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA. Cette étape a permis de prononcer la réception provisoire du supercalculateur. Ce jalon majeur ouvre maintenant la période de « validation en service régulier ». Elle sera consacrée à la stabilisation de la machine avec, en particulier, la réalisation de « grands challenges » pour la défense, l'industrie et la recherche, des calculs qui sollicitent le maximum de ressources de la machine.

25 millions de milliards d'opérations par seconde

Dédié au programme Simulation de la DAM, Tera 1000-2 sert à simuler le fonctionnement des armes nucléaires. Le calculateur marque une rupture par les parallélismes mis en œuvre sur ses 540 000 cœurs de calcul. Les codes de simulation pourront exploiter la pleine puissance de calcul qu'offre la machine, qui peut atteindre 25 millions de milliards d'opérations par seconde (25 petaflops).

Tera 1000-2 intègre les tout derniers modules de calcul « Sequana » et réseaux d'interconnexion « BXI » développés chez Bull, résultats de la collaboration de R&D entre la DAM et l'industriel Atos. Un seul module Sequana peut délivrer quasiment les trois-quarts de la puissance de calcul de Tera 100[2], avec une efficacité énergétique améliorée d'un facteur 25. Ces modules utilisent une technologie nouvelle de refroidissement par une circulation d'eau tiède au plus près des processeurs. Tera 1000-2 préfigure ainsi les architectures et les technologies qui seront mises en œuvre à l'horizon 2021 dans le prochain calculateur de la DAM, Exa 1, de classe exaflopique, et permet ainsi de préparer l'adaptation des codes de calcul à cette évolution technologique majeure.

Notes :

1. 1 exaflops = 1 milliard de milliards d'opérations flottantes par seconde.
2. Tera100 atteignait 1,3 petaflops.

Fusion nucléaire

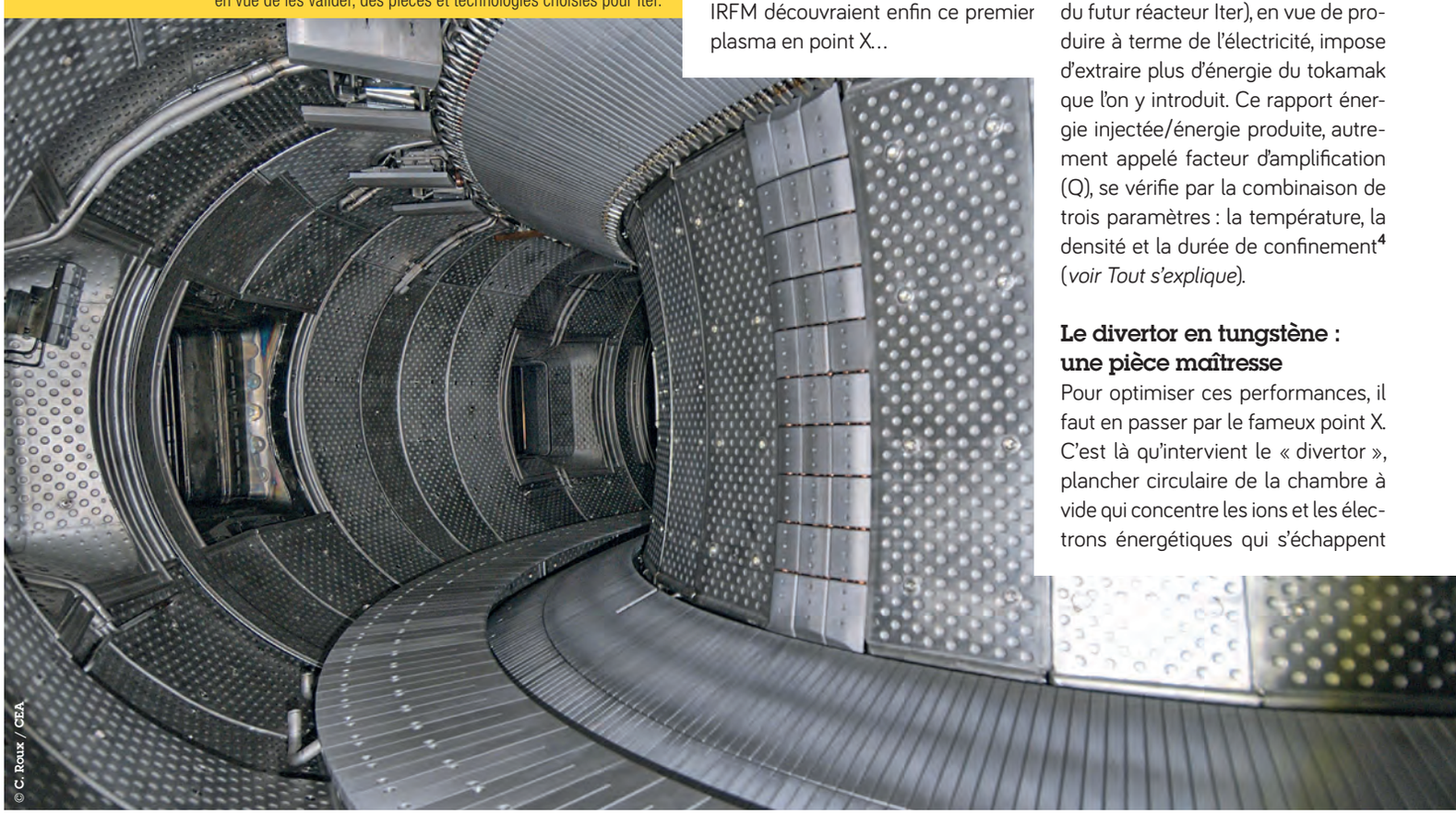
Premier plasma en point X pour West

Le 18 décembre dernier, le réacteur expérimental de fusion nucléaire du CEA, West, a réalisé son premier « plasma en point X ». Il rejoint ainsi la famille des tokamaks avec divertor, au nombre de huit dans le monde[1] ; et va pouvoir remplir sa mission première : tester le divertor en tungstène hautement refroidi, en vue de son utilisation dans le futur réacteur Iter[2].

par Aude Ganier

Notes :
1. Jet (tokamak européen) et **Mast** (Angleterre) ; **ASDEX Upgrade** (Allemagne) ; **DIII-D et NSTX** (États-Unis) ; **East** (Chine) ; **K-Star** (Corée du Sud) ; **TCV** (Suisse).
2. Actuellement en construction à Cadarache.
3. Modifications réalisées de 2013 à 2016 pour intégrer au tokamak, en vue de les valider, des pièces et technologies choisies pour Iter.

*« Nous avions obtenu un premier **plasma**, du moins une étincelle, fin 2016. Mais, comme les alimentations électriques des nouvelles bobines poloïdales du champ magnétique n'étaient pas encore en service, il nous était impossible de configurer ce plasma en point X »,* se souvient Jérôme Bucalossi, chef du projet West au CEA-IRFM. Début 2017, une fois ces aimants qualifiés, les équipes rencontraient toutefois des difficultés. En cause, des perturbations du courant dues aux modifications successives apportées aux différents éléments du **tokamak** CEA pour passer de la version Tore Supra à West[3]. Et, le 18 décembre, les yeux rivés aux écrans de contrôle de la salle de commande, les équipes du CEA-IRFM découvraient enfin ce premier plasma en point X…


© C. Roux / CEA

Confiner le plasma le plus loin des parois internes du tokamak

Le « point X » est un mode de **confinement magnétique** par lequel la frontière du plasma ne touche plus les parois internes de la chambre à vide. En effet, la température de ces parois étant bien inférieure à celle du plasma, le moindre contact le refroidit et peut le faire disparaître. Si le plasma était déjà confiné dans Tore Supra, par un « limiteur », sa forme circulaire en contact avec la paroi empêchait de gagner en performance. Rappelons que l'enjeu de la fusion (et du futur réacteur Iter), en vue de produire à terme de l'électricité, impose d'extraire plus d'énergie du tokamak que l'on y introduit. Ce rapport énergie injectée/énergie produite, autrement appelé facteur d'amplification (Q), se vérifie par la combinaison de trois paramètres : la température, la densité et la durée de confinement[4] (*voir Tout s'explique*).

Le divertor en tungstène : une pièce maîtresse

Pour optimiser ces performances, il faut en passer par le fameux point X. C'est là qu'intervient le « divertor », plancher circulaire de la chambre à vide qui concentre les ions et les électrons énergétiques qui s'échappent

CEA - IRFM
Institut de recherche sur la fusion
par confinement magnétique

© C. Roux / CEA.

Intégration de six lames de « technologie Iter » au divertor de West.

du plasma. Il a ainsi deux fonctions : extraire les effluents gazeux, et extraire une partie de la chaleur produite par les réactions de fusion nucléaire. Des bobines poloïdales sont placées sous ce divertor pour conférer au plasma une forme « en D » et lui assurer un confinement optimal : c'est le point X, véritable bouclier magnétique.

Par ailleurs, ce divertor est activement refroidi, par un mécanisme interne de circulation d'eau sous pression qui doit le maintenir à 1 000 °C (face aux millions du plasma). *« Cette innovation permettra d'atteindre des plasmas de longue durée »*, assure Jérôme Bucalossi.

Tester les premiers composants du divertor activement refroidi

Après de nombreuses recherches de part et d'autre de la planète[5], le choix s'est porté, pour Iter, sur un divertor en tungstène, plutôt qu'en carbone. Dans West, il est constitué de 450 lamelles creuses où circule le système de refroidissement. *« Lors de ces premiers essais, seules six lamelles réalisées par des équipes chinoises et japonaises étaient de "technologie Iter". Cela nous a quand même permis d'obtenir ce point X pendant plusieurs secondes. Il est en effet prévu de refroidir l'ensemble des lamelles dans une deuxième phase, après les tests des différents prototypes,* explique le chercheur. *À présent, nous préparons une deuxième série d'expériences avec six nouvelles lamelles fournies par les équipes européennes en charge du divertor d'Iter. »* Ces essais permettront d'ailleurs de valider les meilleures options technologiques, y compris du processus de fabrication, de ces composants.

De prochaines campagnes expérimentales en vue d'atteindre le mode de confinement le plus performant

Le « point X » n'est qu'une étape, tel que l'explique l'expert : *« dans les années 1990, nous nous sommes aperçus que la présence d'un point X pouvait doubler les performances d'un plasma : au-dessus d'une température seuil, il transite d'un mode de confinement bas à un mode amélioré, dit mode H. C'est ce dernier qui sera mis en œuvre dans le futur réacteur Iter mais, sans point X, nous ne pouvons pas l'atteindre. »* Le mode H est ainsi le prochain objectif des équipes qui mèneront des campagnes expérimentales sur des portions de plus en plus grandes du divertor. Ils espèrent bien qu'en 2020, cette pièce maîtresse sera complètement « de type » Iter, dont l'exploitation pourrait démarrer en 2025. ◆

Plasma
Quatrième état de la matière caractérisé par des températures et des densités très élevées.

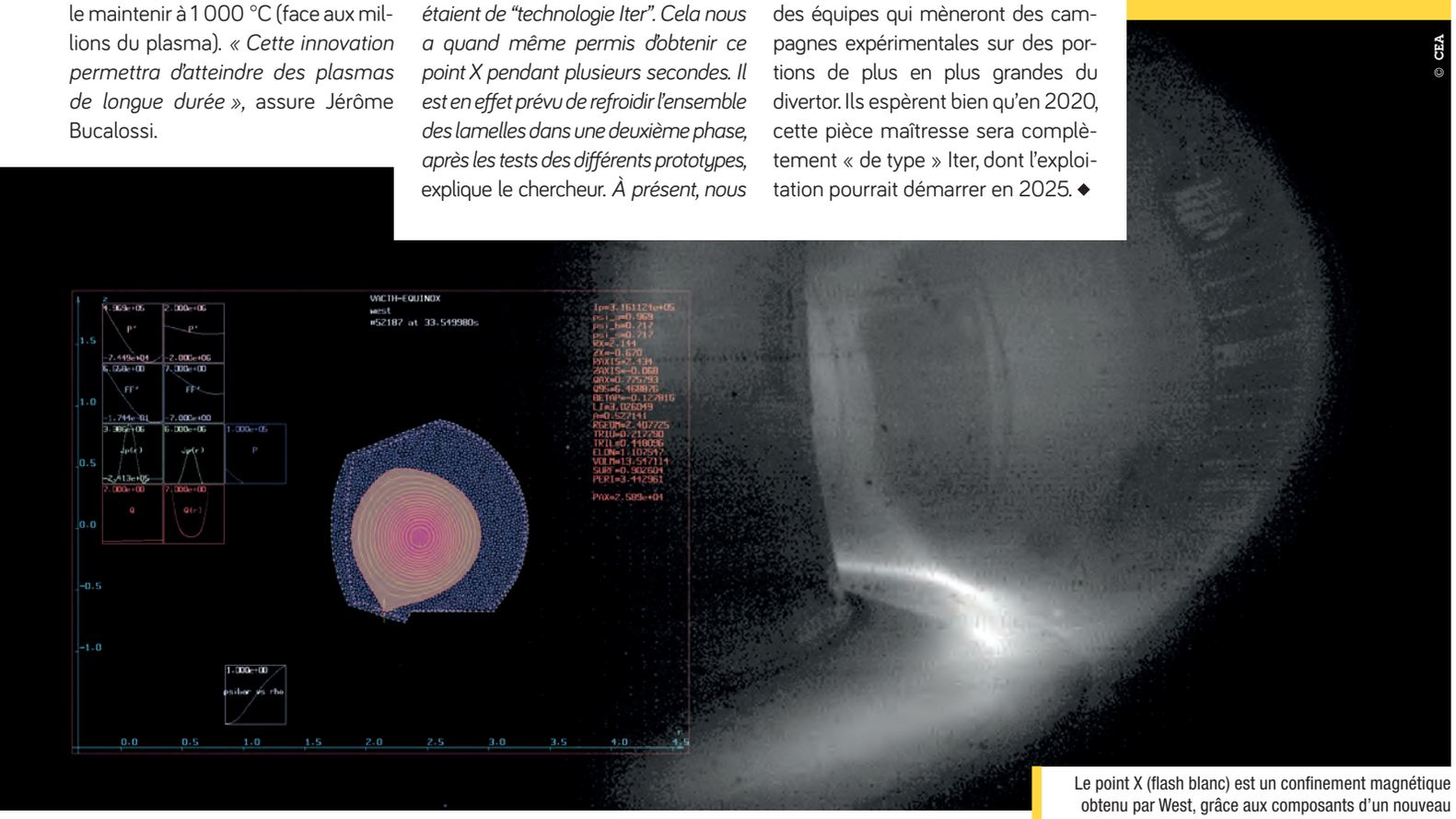
Tokamak
Réacteur permettant de créer et de confiner un plasma dans une cage magnétique en forme d'anneau (du russe *Toroidalnaya Kamera Magnitnymi Katushkami*).

Confinement magnétique
Création de lignes de champs magnétiques par différentes bobines autour desquelles les particules du plasma « s'enroulent » évitant leur dispersion multidirectionnelle et permettant ainsi au plasma d'être confiné.

Notes :

4. Temps caractéristique de refroidissement du plasma quand on arrête son chauffage.

5. Principalement en Grande-Bretagne, Allemagne, États-Unis et France (CEA).



© CEA

Le point X (flash blanc) est un confinement magnétique obtenu par West, grâce aux composants d'un nouveau divertor (plancher intérieur, *voir photo page 8*).

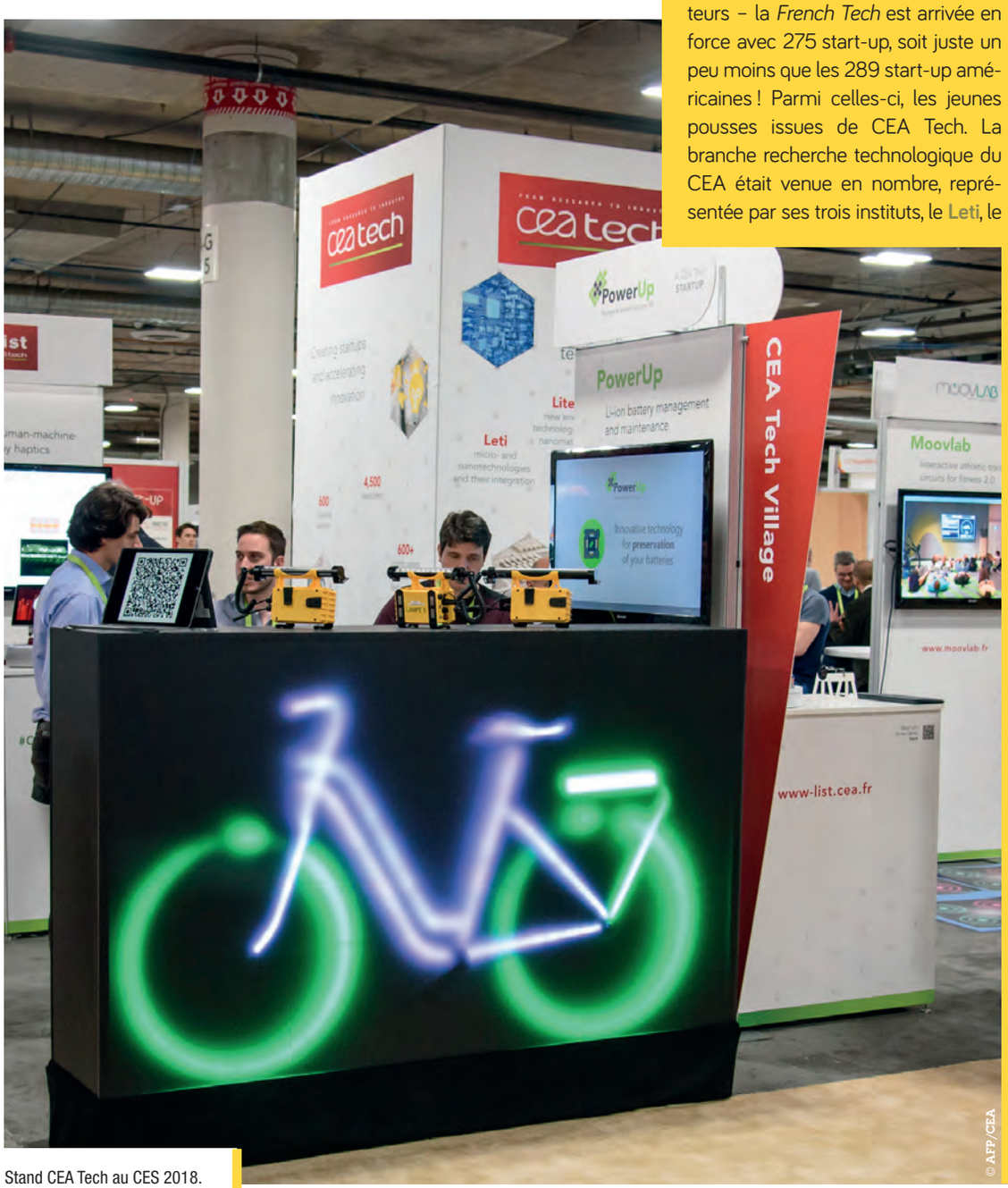
Innovation

Le CEA et ses start-up s'affichent à Las Vegas

CES… C'est LE rendez-vous annuel de l'innovation ! CEA Tech y était, aux côtés de 7 start-up nées de ses technologies.

par Sylvie Rivière

La France n'est pas passée inaperçue au *Consumer Electronics Show* 2018 ! Sur le plus grand salon mondial de l'électronique grand public – 4 500 exposants venant de 150 pays ; 170 000 visiteurs – la *French Tech* est arrivée en force avec 275 start-up, soit juste un peu moins que les 289 start-up américaines ! Parmi celles-ci, les jeunes pousses issues de CEA Tech. La branche recherche technologique du CEA était venue en nombre, représentée par ses trois instituts, le Leti, le List et le Liten. *« Nous participons au CES pour accompagner nos start-up dans la recherche de clients et d'investisseurs, mais aussi pour présenter notre offre technologique, notamment au travers de nos démonstrateurs. C'est le lieu où se retrouvent les meilleurs acteurs mondiaux de l'innovation, et il est important que CEA Tech y soit présent »*, indique Stéphane Siebert, Directeur de CEA Tech.



© AFP/CEA

Stand CEA Tech au CES 2018.

Démonstrateurs aux technologies futuristes

La mobilité de demain intègrera-t-elle la technologie anti-crash 360Fusion ? Le système présenté par CEA Tech et testé sur le stand a montré son efficacité : embarqué sur un drone pour les besoins de la démonstration, 360Fusion permet à l'appareil de détecter et éviter tout obstacle grâce à un algorithme qui intègre et fusionne les données de six laser lidar en temps réel. Toujours dans le domaine de la mobilité, Deep Manta et son algorithme d'intelligence artificielle pourraient bien équiper les véhicules autonomes pour éviter les accidents. Il procure au système de pilotage une analyse 3D de son environnement en temps réel, grâce à un analyseur d'images vidéo. La force de Deep Manta est de pouvoir répondre à différentes questions simultanément : détection de véhicules, de leurs volumes, de leurs positions, de leur distance et même indication des modèles…

© AFP/CEA

Le démonstrateur Matiss.

CEA - Leti
Laboratoire des micro & nanotechnologies et leur intégration dans les systèmes

CEA - List
Laboratoire des systèmes numériques intelligents

CEA - Liten
Laboratoire des nouvelles technologies de l'énergie et des nouveaux matériaux

La technologie anti-crash 360Fusion, embarquée sur un drone, a été testée par Mounir Mahjoubi, secrétaire d'État chargé du numérique.

PLACE AUX START-UP

Sept start-up porteuses de technologies développées à CEA Tech étaient également du voyage. Objectifs : sortir du lot, avoir de la visibilité, trouver des investisseurs, voire des distributeurs et des acheteurs pour les plus matures.

- **Aryballe Tech :** capteurs biochimiques pour la détection d'odeurs et de goûts
- **Diabeloop :** pancréas artificiel pour diabétiques de type 1
- **eLichens :** capteurs et services pour la surveillance de la qualité de l'air
- **Kalray :** circuits programmables mutiprocesseurs
- **Moovlab :** parcours de training interactifs pour le fitness 2.0
- **PowerUp :** gestion et maintenance de batteries Li-ion
- **Sport quantum :** cibles de tir électroniques interactives et connectées.

Un bracelet contre les apnées du sommeil

Pour ceux qui souffrent d'apnée du sommeil, Apneaband sera peut-être la solution. Ce bracelet truffé de capteurs mesure le rythme cardiaque, la saturation en oxygène, la vasoconstriction (réduction de la taille des vaisseaux sanguins) et le rythme respiratoire pendant le sommeil… Toutes ces données compilées en font un outil portable au poignet, utilisable chez soi et fiable, capable de surveiller en temps réel les apnées du sommeil. Autre démonstrateur présenté : Matiss. Cette interface homme-machine (IHM), à l'apparence d'un bouton rotatif, permet de reproduire fidèlement la sensation d'effort. À l'intérieur ? Un fluide magnétorhéologique. Cette huile chargée en particules ferromagnétiques a en effet la propriété de changer de viscosité en fonction du champ magnétique appliqué. À la clé : une sensation de toucher d'une grande finesse entièrement programmable pour de nombreuses applications : IHM pour l'automobile, simulateurs, chirurgie, jeux vidéo…

Un bilan positif

Enfin, Organ~IC propose un nouveau type de surface interactive. Il s'agit là d'électronique imprimée sur des supports très fins. Elle combine deux fonctions, dont l'une peut être vibratoire ou sonore. Organ~IC permet par exemple d'activer une fonction haut-parleur par simple toucher, avec un retour vibratoire sous le doigt. Idéal sur un tableau de bord de voiture, pour lancer la radio sans quitter la route des yeux. L'essentiel des applications reste cependant à imaginer… *« Cette visibilité de nos technologies a été extrêmement précieuse, notamment pour envisager leur transfert à une start-up ou à un industriel,* commente Stéphane Siebert. *Nous avons pu établir de très bons contacts avec nos partenaires principaux. Même bilan du côté de nos start-up, très remarquées sur ce CES 2018. »* ◆

La technologie Organ~IC.

Arcus : au-dessus de la dune du Pilat lors d'un orage.

Le climat dans l'oeil du cyclone

P.14
Le casse-tête climatique

P.16
Aléas climatiques extrêmes : la preuve par 4

P.19
Des écosystèmes de plus en plus vulnérables

2017, année la plus chaude, en l'absence du phénomène El niño ! Cette année aura également vu les émissions de CO_2 repartir à la hausse, des vents très forts (jusqu'à 295 km/h) balayer les Antilles, de nouvelles vagues de chaleur causer de terribles incendies…

Plus que jamais, la question du lien entre ces événements et le réchauffement climatique mérite d'être posée. Pour y répondre, et en l'absence de données sur le long terme, les climatologues font tourner leurs modèles. Quelques tendances se dessinent, mais la prudence reste de mise quant à la corrélation de ces événements.

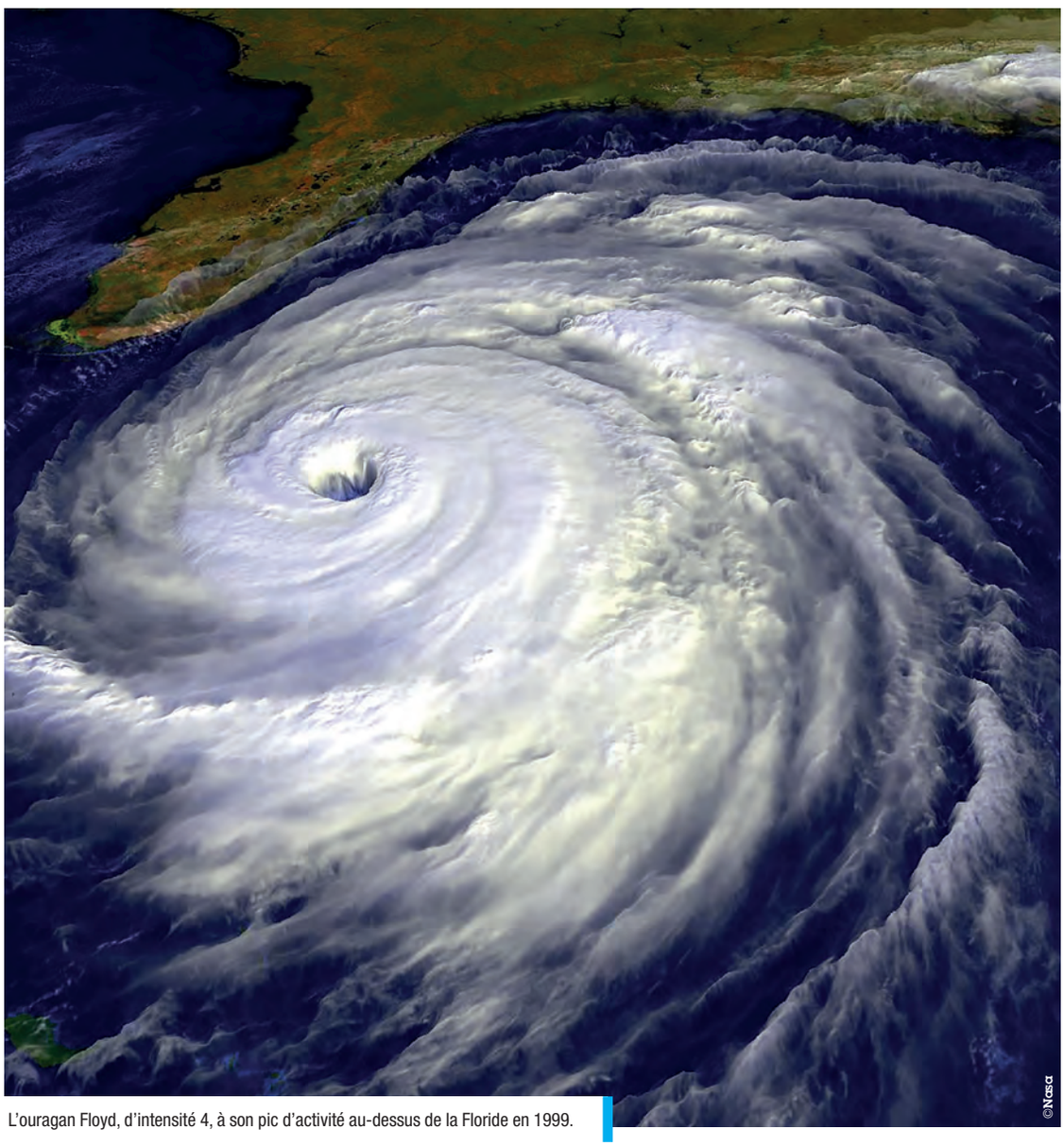
Il n'empêche, le temps presse avant que la machine climatique ne s'emballe de manière irréversible.

par Fabrice Demarthon

Le casse-tête climatique

Cyclone, tempête, canicule… Y'a-t-il un lien de cause à effet entre la multiplication de ces événements extrêmes et le réchauffement climatique ? La réponse n'est pas si simple. En cause, la complexité de la machine climatique, mais aussi la difficulté à modéliser et à effectuer des calculs probabilistes sur des phénomènes parfois très concentrés.

Fin août 2017, les Petites Antilles sont en état d'alerte maximal : l'ouragan Irma, formé au large de l'Afrique, traverse l'océan et se dirige vers l'archipel. Il est classé en catégorie 5, le niveau de puissance le plus élevé. Avec des vents allant jusqu'à 295 km/h et une superficie presque équivalente à celle de la France métropolitaine, il finit par dévaster les îles Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Barbuda… Le même été de cette année considérée comme la plus chaude depuis le début des relevés (fin XIXe siècle)[1], le sud et l'est de l'Europe subissent une vague de chaleur intense que la presse italienne surnomme « Lucifer ». Le 4 août, pas moins de 11 pays sont en état d'alerte canicule avec des températures dépassant allègrement les 40 °C.



L'ouragan Floyd, d'intensité 4, à son pic d'activité au-dessus de la Floride en 1999.

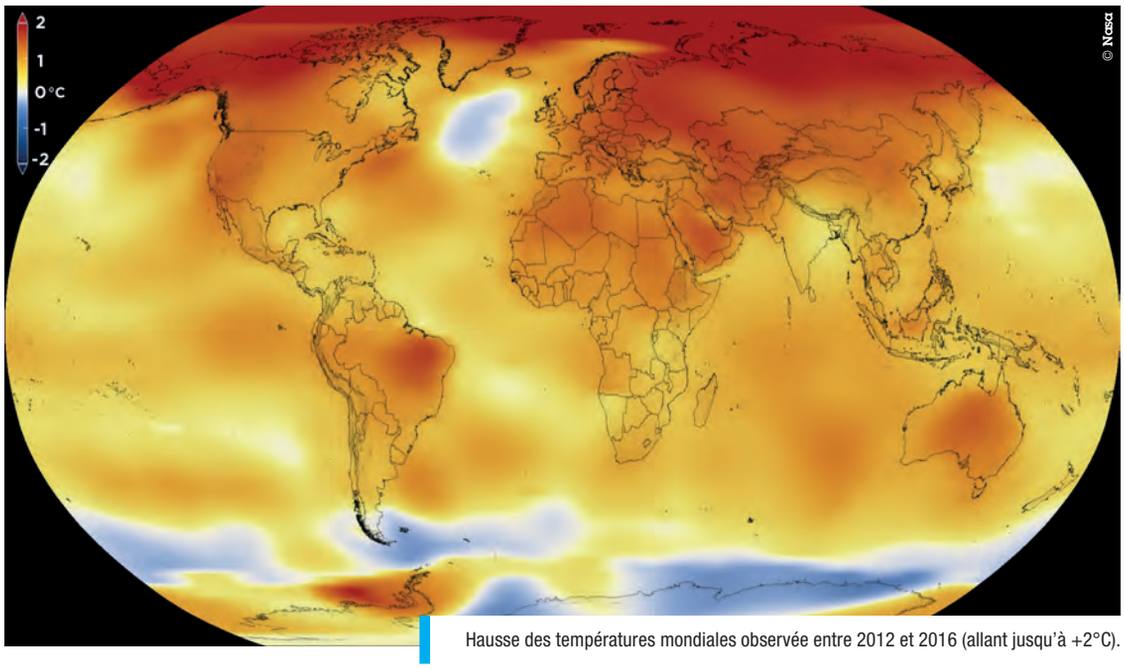
Vulnérabilité, rareté… : comment aborder les extrêmes climatiques ?

Cyclones, tempêtes, vagues de chaleur et de froid, inondations… À chacune de ces catastrophes climatiques revient la même question : le réchauffement climatique est-il impliqué ? *« Il n'y a pas de réponse univoque à cette question,* prévient d'emblée Robert Vautard, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE[2]), en région parisienne. *Les réponses varient selon le type d'événement et sa localisation sur le globe. »*

Étudier les événements climatiques extrêmes et prévoir leur évolution future, en termes d'occurrence et d'intensité n'est pas une mince affaire. Ils résultent d'une dynamique complexe, d'actions et de rétroactions entre les différents systèmes qui composent notre planète : atmosphère, océans, biosphère… S'y ajoute la notion primordiale de vulnérabilité. *« Il y a plusieurs manières d'aborder les événements extrêmes,* indique Robert Vautard. *Mathématiquement, ou plutôt statistiquement, il s'agit de phénomènes dont une ou plusieurs grandeurs physiques (température, force du vent, etc.) s'éloignent fortement de la "moyenne". Mais peut-on qualifier d'extrême une tempête sur l'océan dont personne n'est témoin ? Aujourd'hui, le concept d'événement climatique extrême prend aussi en compte l'impact sur les sociétés et les écosystèmes. »*

Définir les extrêmes climatiques s'apparente donc à un véritable numéro

d'équilibriste entre mathématiques, climatologie, sociologie et économie. *« Pour bien appréhender ces phénomènes, il faut des indicateurs fiables, des seuils de vulnérabilité au-delà desquels on peut les considérer comme extrêmes,* ajoute Pascale Braconnot, du LSCE. *Or, ces indicateurs, pourtant critiques dans nos recherches, peuvent difficilement être généralisés : une canicule dépend certes de la température voire de celle ressentie, mais aussi du pays dans lequel elle survient… »* Outre la définition même du caractère extrême de ces aléas, leur rareté est un autre écueil auquel doivent faire face les climatologues. Elle impacte à la fois l'étude des événements passés et le calcul de probabilité des événements futurs : plus un phénomène est rare, plus il est difficile d'en observer la modification à long terme. *« Nous manquons de données,* admet Pascal Yiou, du LSCE. *Nous faisons face à un sous-échantillonnage chronique qui biaise nos études. »*



Hausse des températures mondiales observée entre 2012 et 2016 (allant jusqu'à +2°C).

Modéliser et simuler les probabilités

Pour comprendre la complexité des recherches sur les aléas extrêmes, il faut imaginer le climat comme un dé : à chaque lancer, des phénomènes météorologiques apparaissent sur le globe. *« Mais toutes les faces n'ont pas la même probabilité de tomber,* note Pascal Yiou. *À quoi ressemblent les plus rares ? Préexistaient-elles bien avant le lancer sans être jamais "tombées", ou sont-elles apparues récemment ? C'est toute la question des études sur les événements extrêmes dans le cadre du réchauffement climatique. C'est aussi l'enjeu des modélisations. »*

En effet, une large part des recherches en climatologie est réalisée *in silico*. Des supercalculateurs simulent le climat de la planète et son évolution au fil des ans selon plusieurs scénarios, du plus pessimiste au plus optimiste quant à nos rejets de gaz à effet de serre (GES). *« Si l'on reprend notre analogie du dé, une simulation est un lancer,* explique Pascal Yiou. *Les ordinateurs permettent d'en faire des dizaines de milliers en faisant varier quelques paramètres, notamment la quantité de GES dans l'atmosphère. On peut alors tenter de voir si certains événements climatiques extrêmes apparaissent ou non, et ainsi établir une corrélation avec le réchauffement climatique. »*

Seulement voilà, cela ne vaut aujourd'hui que pour les aléas à grande échelle comme les vagues de chaleur : la résolution des modèles climatiques actuels, de quelques centaines de kilomètres, est encore trop large pour décrire avec précision des phénomènes concentrés, les cyclones tropicaux par exemple, dont la dynamique peut varier rapidement sur seulement quelques dizaines de kilomètres. Des modèles à haute résolution existent déjà, mais la puissance de calcul nécessaire pour les faire tourner et la quantité de données produites sont telles que leur utilisation reste problématique. *« La nouvelle génération de modèles devrait émerger d'ici deux à trois ans »,* indique Robert Vautard. Parallèlement des outils statistiques très perfectionnés sont développés, notamment par Pascal Yiou, afin de réduire les temps de calcul. *« La prévisibilité des aléas climatiques extrêmes est mesurable mais on voit bien qu'elle évolue avec le changement climatique,* conclut ce dernier, qui milite pour un suivi continu de ces événements. *Aujourd'hui, ces phénomènes suivent des lois physiques que nous connaissons mais si les conditions de leur genèse changent, alors il faudra revenir à nos fondamentaux et revoir les lois. »* ◆

Notes :

1. 2017, année la plus chaude recensée en l'absence du phénomène El Niño (Organisation météorologique mondiale).

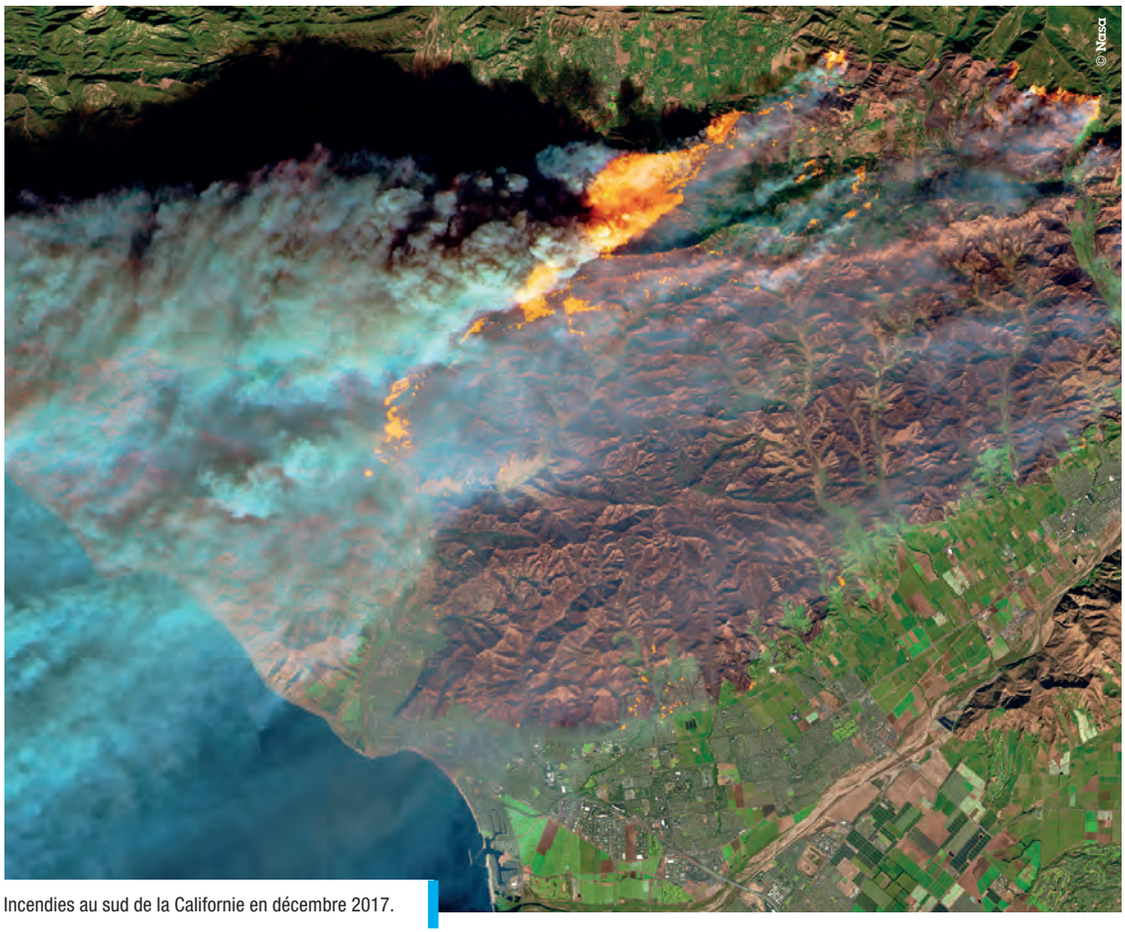
2. Unité mixte CEA/CNRS/Université Versailles Saint Quentin en Yvelines.

À SAVOIR

Les tempêtes tropicales apparaissent entre les tropiques du Cancer et du Capricorne. Elles sont appelés **ouragans** quand elles se forment dans les océans Atlantique et Pacifique Nord-Est, **cyclones** dans les océans Indien et Pacifique Sud, et **typhons** dans le Pacifique Nord-Ouest (Asie).

La classification de leur intensité par l'échelle de Saffir-Simpson, compte **5 niveaux** :
1 = vents soutenus de 119 à 153 km/h ; **2** = 154 à 177 km/h ;
3 = 178 à 210 km/h ; **4** = 211 à 251 km/h ; **5** = plus de 251 km/h.

Aléas climatiques extrêmes : la preuve par 4



Incendies au sud de la Californie en décembre 2017.

Plus fréquents, plus intenses… le verdict du Giec concernant les évènements extrêmes est sans appel. Vagues de chaleur, sécheresses, inondations, tempêtes, ces phénomènes ne sont pas impactés de la même manière par le dérèglement du climat. Revue de détail.

Dans leur dernier rapport sur les catastrophes climatiques et leur gestion[1], les scientifiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) n'y vont pas par quatre chemins : *« L'évolution du climat modifie la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et le moment d'apparition des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, et peut porter ces phénomènes à des niveaux sans précédent. »* Pour autant, tous les aléas ne sont pas impactés de la même manière par le réchauffement d'origine anthropique.

Coup de chaud

C'est une quasi-certitude, notre futur sera plus chaud. Les données météorologiques recueillies depuis les années 1950 le montrent bien : à l'échelle du globe, le nombre de journées et de nuits chaudes croît, tandis que les plus froides diminuent. *« Il est très probable que les vagues de chaleur augmenteront à la fois en fréquence, en amplitude et en durée »*, abonde Robert Vautard.

L'exemple de l'été 2017 en France est frappant. Le mois de juin y est exceptionnellement chaud : avec une température moyenne de 21,2 °C, il se classe deuxième au palmarès des mois de juin les plus chauds depuis 1900, juste après celui de 2003 (22,4 °C). Quant à la vague de chaleur survenue entre le 18 et le 22, elle surprend par sa précocité et son intensité. Or, les analyses des simulations réalisées sur différents modèles climatiques[2] montrent clairement un effet « réchauffement climatique ». *« La probabilité qu'un tel événement survienne au XXe siècle (entre 1971 et 2000) était presque dix fois moindre »*, indique Robert Vautard. Et cela pourrait s'aggraver si aucune mesure de réduction des gaz à effet de serre (GES) sérieuse n'était prise : la fréquence de ces événements pourrait atteindre les 5 à 10 ans, contre 20 actuellement.

Comment l'expliquer ? Il apparaît encore difficile d'identifier une origine unique dans la mesure où les mécanismes météorologiques à l'œuvre diffèrent d'une région à l'autre. Cependant, avec l'augmentation des GES due aux activités humaines, c'est tout le système Terre qui se réchauffe.

Notes :

1. Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique, Rapport spécial du Giec, 2015.
2. Projet Extrêmoscope, mené conjointement par l'Institut Pierre Simon Laplace (fédération de laboratoires de recherche sur le climat dont fait partie le LSCE) et Météo France.

Le scénario le plus pessimiste, correspondant à la prolongation des émissions actuelles *(business as usual)*, table sur une élévation de 5 °C de la température moyenne du globe. Un réchauffement qui bouleversera la dynamique atmosphérique : par exemple, avec le radoucissement en Arctique, les **courants jets** peuvent être perturbés et former des boucles[3] qui provoqueraient un « blocage » de la situation météorologique en Europe de l'Ouest ; or, c'est en partie un tel blocage de l'anticyclone des Açores au-dessus du pays qui avait conduit à la canicule de 2003.
« La canicule de 2003 est un phénomène climatique typique de la fin du siècle, prévient Robert Vautard. *Mais sa durée et son intensité sont bien inférieures à celles des vagues de chaleur les plus fortes qui nous attendent au cours des 30 dernières années du XXIe siècle. »* Parallèlement, les vagues de froid seraient moins nombreuses. *« Des résultats de nos travaux non publiés montrent que la probabilité de subir un nouvel hiver comme celui de 1963, le plus long et le plus rigoureux jamais enregistré en France depuis la fin du XIXe siècle, est désormais divisée par deux »*, ajoute le chercheur.

Le cycle de l'eau impacté

Si l'avenir nous réserve des canicules plus fortes et plus longues, souffrirons-nous aussi de la sécheresse ? Le lien entre chaleur et manque d'eau pourrait paraître évident. Il est pourtant loin d'être clairement établi : la sécheresse est un phénomène complexe, les observations restent encore partielles et il est difficile de distinguer l'évolution à long terme des variations décennales naturelles. Les experts du Giec notent ainsi que *« certaines régions ont subi des sécheresses plus intenses et plus longues, notamment en Europe méridionale et en Afrique de l'Ouest, tandis que le phénomène est devenu moins fréquent, moins intense ou plus court ailleurs, par exemple dans le centre de l'Amérique du Nord et dans le nord-ouest de l'Australie. »* Tout dépendra donc de la région considérée. Par exemple, en 2015, de puissantes vagues de chaleur conjuguées à un manque de pluies ont provoqué en Éthiopie la pire sécheresse depuis 50 ans, impactant plus de 10 millions de personnes. Une étude publiée dans le Bulletin spécial de l'Association américaine de météorologie[4] montre que le réchauffement climatique a bien eu un impact sur cette sécheresse.
Si certaines régions vont souffrir du manque d'eau, d'autres seront régulièrement arrosées. *« Il est probable que la fréquence de fortes précipitations ou la part de ces dernières dans la pluviosité totale augmentera au XXIe siècle dans de nombreuses régions. Cela vaut surtout pour les hautes latitudes et les zones tropicales et, en hiver, pour les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord »*, notent ainsi les experts du Giec. *« Le mécanisme est plutôt simple à comprendre : plus il fait chaud, plus l'eau s'évapore et donc plus il pleut »*, indique Robert Vautard. La France n'est pas épargnée. Par exemple, en automne, les Cévennes sont en proie à d'intenses pluies produisant des crues violentes et parfois meurtrières : les cumuls journaliers pouvant en effet atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'eau, soit l'équivalent de ◆◆◆

À SAVOIR

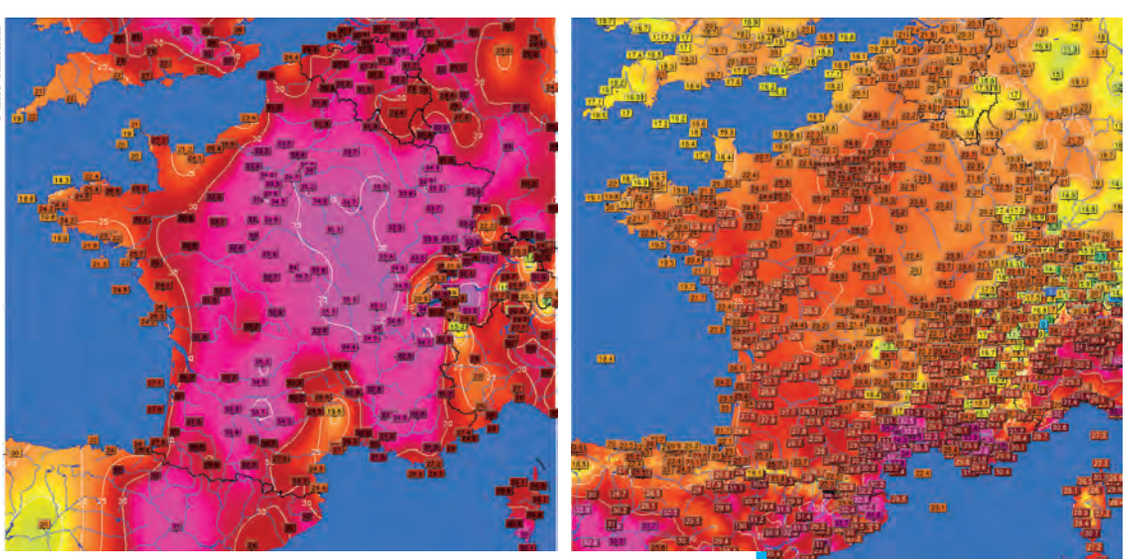
Le réchauffement d'origine anthropique correspond à l'augmentation de la température moyenne de la Terre du fait de l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre issus des activités humaines.

Les orages cévenols dans le Massif Central sont causés par la rencontre entre l'air chaud et humide de la Méditerranée et les masses d'air froid en provenance de l'Atlantique, avec un effet d'ascendance en partie lié au relief.

Il n'existe pas de définition internationale d'une canicule, puisqu'elle dépend de la zone géographique et de l'activité concernée. Certaines études en France ont pris pour indicateur un excès de température de 5 °C par rapport aux normales saisonnières sur au moins cinq jours.

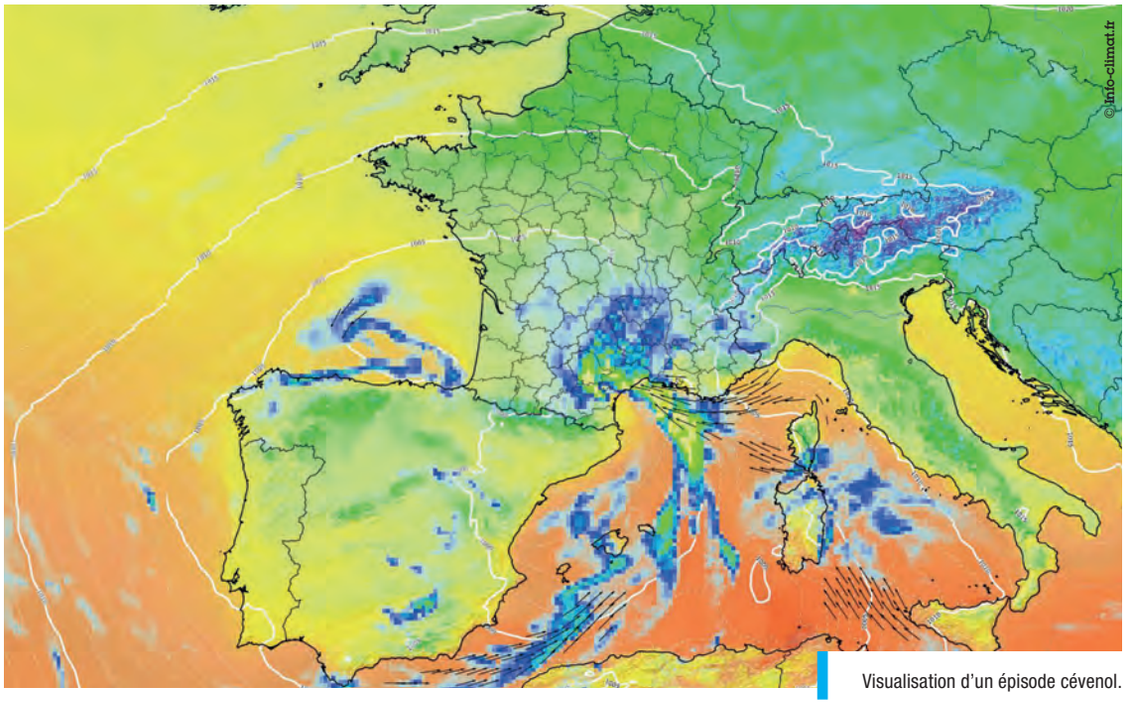
En météorologie marine, une tempête correspond à la force 10 (vents moyens de 89 à 117 km/h et rafales de 110 à 150 km/h) de l'échelle Beaufort qui estime ces vitesses par rapport à l'état de la mer. Par analogie, les tempêtes sont des systèmes dépressionnaires générant des rafales de vent proches de 100 km/h dans l'intérieur des terres et 120 km/h sur les côtes. Depuis 1980, 41 tempêtes majeures ont été observées en France, dont les plus nombreuses sont survenues dans les décennies 1980 et 1990.

Courants jets
Vents forts de haute altitude qui séparent l'air froid des pôles de celui, plus chaud, des tropiques.


© info-climat.fr

A g., températures au 17 juillet 2003 lors de la canicule. A d., températures au 17 juillet 2017.

Notes :
3. *Mann et al., Scientific Reports 7, Article number: 45242* (2017).
4. *Explaining extreme events of 2015 from a climate perspective, Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 97, No. 12, December 2016.*



Visualisation d'un épisode cévenol.

> ***La résolution des modèles est encore trop faible pour simuler explicitement les phénomènes orageux.***
> *Robert Vautard, LSCE*

mois de précipitations dans le nord de la France. Les études menées au LSCE montrent que l'amplitude des précipitations a augmenté de 20 % environ depuis 1960 et la probabilité de dépasser des seuils très élevés (300 mm/jour) a triplé en 65 ans. *« Ces évolutions sont probablement liées aux effets des activités humaines sur le climat car les simulations climatiques retrouvent ces tendances,* observe Robert Vautard. *Toutefois, la résolution des modèles est encore trop faible pour simuler explicitement les phénomènes orageux. »*

Avis de vents forts

Vagues de chaleur, sécheresses, inondations… Le réchauffement climatique nous réserve-t-il aussi des vents plus forts ? Non, répondent les scientifiques. *« En l'état actuel des connaissances, rien ne permet d'indiquer que les tempêtes hivernales qui traversent l'Atlantique et touchent parfois les côtes françaises, comme ce fut le cas en ce début d'année 2018, seront plus nombreuses, ou qu'il y aura plus de cyclones tropicaux »,* précise Pascal Yiou. Avec plus de chaleur, plus d'évaporation et donc plus d'énergie dans l'atmosphère, il est toutefois possible que l'intensité de ces derniers augmente. *« Mais cela n'est ni complètement vérifié scientifiquement ni modélisé »,* prévient Robert Vautard. Et même si leur intensité ne changeait pas, les risques que les tempêtes et les cyclones font courir à la population pourraient quand même être accrus : avec l'augmentation du niveau des mers, un fait aujourd'hui clairement établi, les inondations des côtes, où vit la moitié de la population mondiale, seront sans doute bien plus destructrices à la fin du XXIe siècle. ◆

EL NIÑO LE DÉVASTATEUR

El Niño, ou plutôt El Niño/oscillation australe (ENSO), est la plus forte fluctuation naturelle du climat à l'échelle de quelques années. Le Pacifique équatorial est balayé par de forts vents d'est, les alizés, qui repoussent les eaux chaudes ; celles-ci s'accumulent sur le côté ouest de l'immense océan, laissant le champ libre aux eaux profondes et froides de l'est. Durant les épisodes d'El Niño, qui peuvent durer un an à un an et demi et qui surviennent à intervalles irréguliers de deux à sept ans, les eaux chaudes du Pacifique Ouest se déplacent vers l'est à mesure que les alizés faiblissent. L'océan décharge alors de la chaleur à l'atmosphère, ce qui contribue à augmenter la température globale. La circulation atmosphérique de l'ensemble de la planète est alors perturbée, provoquant des sécheresses en Australie et en Afrique, des inondations au Brésil et au Paraguay, des tempêtes de neige au Moyen-Orient…
Les reconstructions à partir de coraux, de coquilles et de sédiments marins, ainsi que les simulations des derniers 10 000 ans indiquent que les caractéristiques géographiques des événements et de leurs impacts seront modifiées par le réchauffement climatique. Certaines études suggèrent un accroissement d'épisodes El Niño intenses dans le futur, mais la grande diversité des événements et la difficulté d'en modéliser correctement tous les aspects rendent ces conclusions encore incertaines.

Des écosystèmes de plus en plus vulnérables

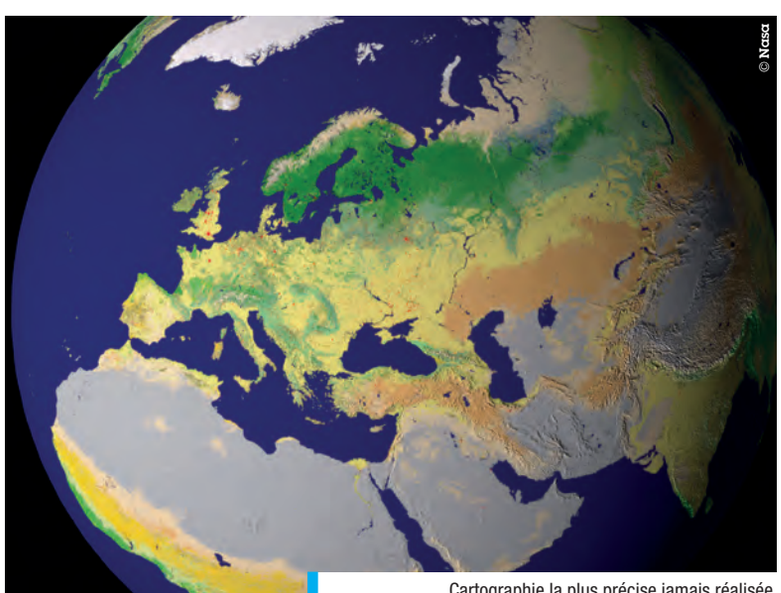
Si les dommages économiques et humains liés aux catastrophes météorologiques sont de plus en plus importants, la capacité des écosystèmes à s'adapter est elle aussi mise à mal. Avec à l'horizon, la limite fatidique de +2 °C, au-delà desquels le point de non-retour sera franchi.

L'étude des extrêmes climatiques ne peut être décorrelée de celle de la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes. L'impact du réchauffement global se fait déjà sentir dans de nombreux domaines et les dommages économiques dus aux catastrophes météorologiques n'ont eu de cesse de croître ; certes, de façon très variable d'une zone et d'une année à l'autre. Les climatologues du Giec observent : *« les pertes imputables […] aux conditions météorologiques et climatiques se répartissent de manière inégale et correspondent essentiellement à la valeur des biens directement endommagés. »*[1] Et la note est déjà salée. Au total, les ouragans Harvey et Irma, qui ont touché les États-Unis et les Petites Antilles en 2017, ont fait plus de 200 morts et les coûts des destructions sont estimés à près de 300 milliards de dollars. Katrina, qui avait ravagé la Nouvelle-Orléans en 2005, aurait coûté à lui seul près de 200 milliards de dollars. Les dommages de la canicule de 2003 se seraient élevés à plus de 10 milliards d'euros, sans compter les 70 000 victimes dénombrées sur le Vieux Continent. *« Ces estimations se situent à la limite inférieure car il est difficile de chiffrer, d'assortir d'une valeur monétaire et, par conséquent, de prendre en compte de nombreux impacts, telle la perte de vies humaines, de patrimoine culturel ou de services procurés par les écosystèmes »*, écrivent les experts.

Écosystèmes au point de rupture

Car si les impacts des aléas extrêmes sur nos sociétés peuvent paraître assez directs et tangibles, ceux sur les écosystèmes sont parfois plus difficiles à mettre en lumière. *« Pour le moment, le réchauffement climatique actuel sous nos latitudes et l'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère sont plutôt bénéfiques aux végétaux,* indique Nicolas Viovy, spécialiste des cycles biogéochimiques au LSCE. *Mais l'augmentation des températures sera problématique : en été, les plantes vont souffrir de la chaleur ; en hiver, elles risquent de ne plus subir le gel nécessaire à la floraison. »* Les plantes cultivées peuvent réagir très fortement à la sécheresse mais elles s'en remettent aussi plus rapidement. Ce n'est pas le cas des forêts, les « poumons » de la planète. *« Une forêt peut résister à un épisode difficile mais cela va affecter sa capacité de résilience,* avertit Nicolas Viovy. *Elle ne va pas se remettre si les extrêmes climatiques se succèdent. »* Certaines simulations montrent ainsi que le réchauffement climatique risque de modifier la physionomie des forêts tropicales : les grands arbres, trop sensibles, vont disparaître au profit des petits spécimens, plus clairsemés. Mêmes constats chez les animaux, dont la répartition géographique est en train de changer, certaines espèces remontant vers le nord ou en altitude à la recherche de frais. *« Nous savons qu'il y a un point de rupture dans le changement climatique, un phénomène de seuil,* explique Nicolas Viovy. *La barre des 2 °C d'augmentation de la température moyenne qui sert de référence aux climatologues n'est pas anecdotique : en deçà de cette valeur, nous savons que notre monde restera plus ou moins le même ; au-delà, il risque d'être radicalement différent. »* ◆

Note :
1. Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique, Rapport spécial du Giec, 2015.



Cartographie la plus précise jamais réalisée de l'usage des sols (Nasa, 2000).

Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot/CEA
Recherche fondamentale, technologique, méthodologique et appliquée en biologie, santé et bioénergie

CEA - Leti
Laboratoire des micro & nanotechnologies et leur intégration dans les systèmes

© iStock

Neurosciences

Dans le bon champ de vision des bébés

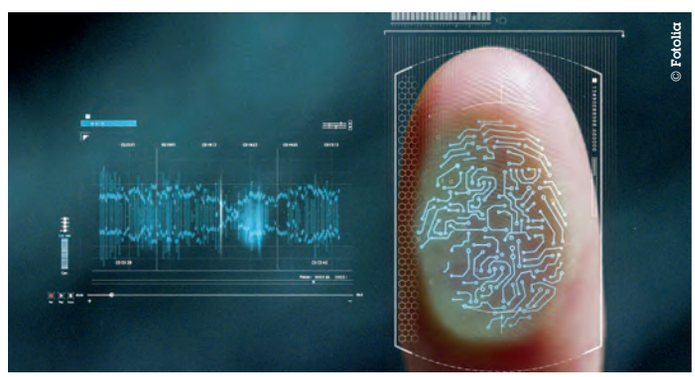
Si vous voulez être reconnu par un bébé, mieux vaut se placer sur sa gauche ! En effet, dès ses premiers mois, le nourrisson apprend rapidement à reconnaître des visages, mais il ne le fait qu'avec son hémisphère droit.
Des chercheurs du **CEA-Joliot**, de l'Inserm et du CNRS ont enregistré l'activité électrique cérébrale de 40 bébés âgés de 1 à 6 mois, à qui ils ont présenté des visages dans les champs de vision droit et gauche, pendant que leur regard était attiré au centre. De temps en temps, un visage nouveau apparaissait à droite ou à gauche. Et il s'est avéré que le cerveau des bébés, précisément leur hémisphère droit, ne discriminait que les visages présentés dans leur champ de vision gauche.
Grâce à l'imagerie par résonance magnétique, ils ont aussi montré que la vitesse des réponses cérébrales augmentait avec la maturation des fibres nerveuses connectant les régions visuelles des deux hémisphères. Néanmoins cette maturation n'est pas encore suffisamment efficace pour que l'hémisphère droit prenne le relais de l'hémisphère gauche « incompétent » pour reconnaître les visages présentés à droite. Ces résultats mettent en évidence d'importantes différences fonctionnelles entre hémisphères cérébraux qui seraient *a priori* établies dès la naissance. *AG*

Dpi (*Dots Per Inch*)
Unité de mesure anglo-saxonne de la résolution utilisée pour les écrans et les imprimantes. En français, il s'agit du « ppp » : points par pouce ou pixels par pouce.

Micro-nano systèmes

Les empreintes digitales passées au crible

C'est un record ! Le capteur d'empreintes digitales, développé dans le cadre du projet européen PiezoMAT par un consortium de huit partenaires dont le **CEA-Leti**, atteint des résolutions supérieures aux exigences du FBI en la matière : plus de 1 000 **dpi**, soit deux fois plus que le minimum requis par le cahier des charges du projet.
Ce capteur est constitué de matrices de bouquets de nanofils d'oxyde de zinc (ZnO), ces derniers formant autant de pixels connectés à leur base qu'à leur extrémité haute. Grâce à leurs propriétés piézoélectriques, les nanofils de ZnO produisent un courant électrique en reprenant leur forme initiale après une compression ou une flexion. Lorsqu'un doigt est posé dessus, la déformation locale du réseau de nanofils génère un potentiel dont l'amplitude est proportionnelle à leur déplacement, ce qui permet de distinguer les reliefs cutanés.
Pour l'occasion, les chercheurs du CEA-Leti ont dû relever plusieurs défis : obtenir une matrice de contacts en ZnO dopé (GZO) sur une puce de silicium avec une forte densité de motifs. Cette matrice a été conçue et fabriquée sur des wafers de 200 mm, en salle blanche. Un démonstrateur de 250 pixels a été testé par Idemia, entreprise française de sécurité numérique spécialisée dans la biométrie, la sécurité digitale, l'identification et l'authentification. *CW*


© Fotolia

Électronique de puissance

Des nanofeuillets de graphène pour des supercondensateurs

Trois équipes du **CEA-Inac** parviennent à doper fortement à l'azote des nanofeuillets de graphène. Testés comme électrodes de supercondensateur, ils ont présenté des performances aussi avantageuses que l'état de l'art des électrodes carbonées. Encouragés par ces résultats, les chercheurs ont ainsi développé un supercondensateur de type pile bouton, utilisant un électrolyte à base de liquide ionique avec des nanofeuillets de graphène dopé. Celui-ci a pu alimenter une LED pendant sept minutes après une charge de moins de vingt secondes. Il reste à optimiser cette technologie prometteuse pour des applications sur puce. *AG*

CEA - Inac
Institut nanosciences et cryogénie
CEA - IBS
Institut de biologie structurale
(CEA-CNRS-Université Grenoble Alpes)

Représentation humoristique de la chimie click.

Biotechnologie

Le « couper-coller » de la chimie

Deux équipes de l'**Institut Frédéric-Joliot** et leurs partenaires ont découvert une réaction chimique permettant de lier et couper sélectivement des molécules directement dans des milieux biologiques, par exemple dans l'organisme. Grâce à deux composés : les iminosydnones et les alcynes cycliques. Cette chimie, appelée *click and release*, permettrait des avancées majeures en médecine, par exemple pour la délivrance ciblée de médicaments. La chimie *click* a déjà permis de développer des technologies de ligation puissantes et utiles pour la préparation de « bioconjugués » à partir de biomolécules et de composés chimiques. En revanche, très peu de réactions de coupures de type *release* ont été décrites à ce jour. Les applications seraient nombreuses. Un exemple ? Accrocher (*click*) un médicament à un anticorps grâce à une iminosydnone ; laisser l'anticorps transporter l'ensemble jusqu'à la cellule cible à traiter ; puis couper le lien avec le médicament (*release*) avec un alcyne cyclique pour le délivrer au bon endroit. Une piste prometteuse pour la médecine du futur ! *SR*

Électronique durcie

Corriger les circuits intégrés dans l'espace

Dans les systèmes spatiaux, les circuits intégrés doivent impérativement pouvoir résister aux particules cosmiques. Celles-ci engendrent en effet des courants parasites qui peuvent altérer certains signaux et introduire des dysfonctionnements. Pour y remédier, des chercheurs de l'**Inac** proposent une nouvelle structure de circuits intégrés, plus robuste en environnement spatial. Celle-ci est composée de deux chaînes de blocs fonctionnels identiques, conçus sur un mode dit asynchrone ou sans horloge. En l'absence d'erreur, les deux chaînes fournissent le même résultat. En cas de différence entre un bloc et son clone, le circuit est temporairement mis en pause à l'endroit où l'erreur a été détectée. Les blocs affectés répètent alors le calcul jusqu'à ce que la perturbation disparaisse automatiquement avec le temps par dissipation électrique. L'erreur est alors corrigée et la chaîne de calcul libérée. Mieux, le fonctionnement du circuit résiste à une erreur se glissant à n'importe quel étage, sans requérir une réinitialisation systématique ! *SR*

Biologie moléculaire

Du nouveau dans la stratégie antibiotique

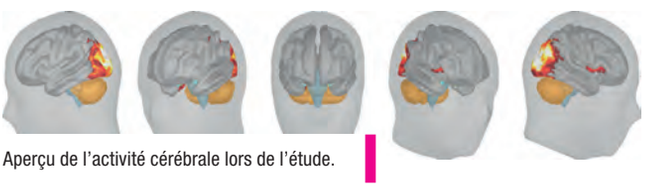
Des scientifiques de l'**IBS** ont identifié une cible potentielle pour de nouveaux antibiotiques, touchant au mécanisme d'élongation des bactéries, étape préalable à leur division. MreC est une protéine du cytosquelette bactérien qui sert d' « ancre » à divers membres du complexe d'élongation. Les chercheurs de l'IBS ont pour la première fois caractérisé le complexe entre une MreC et une autre protéine bactérienne, la *Penicillin-Binding Protein* (PBP), qui intervient dans la synthèse d'un composant essentiel de la paroi de ces micro-organismes. Toute atteinte au développement de ce complexe, qui représente le « cœur » structural de l'élongation, empêche la bonne formation de la paroi lors de l'élongation des cellules filles, générant des cellules de diamètre aberrant finissant par mourir. La surface d'interaction entre les deux protéines MreC et PBP serait donc une cible potentielle pour le développement d'inhibiteurs spécifiques. La voie à un nouveau type d'antibiotiques est ouverte. *SR*

CEA - Liten
Laboratoire des nouvelles technologies de l'énergie et des nanomatériaux

Neurosciences

Comment le conscient et l'inconscient travaillent de concert

Notre cerveau est constamment bombardé d'informations sensorielles. Loin d'être surchargé, cet organe est un véritable expert dans la gestion de ce flux d'informations. Des chercheurs de Neurospin ont découvert comment il intègre et filtre l'information. En combinant des techniques d'imagerie cérébrale à haute résolution temporelle et des algorithmes d'apprentissage automatique *(machine learning)*, les neurobiologistes ont pu déterminer la séquence d'opérations neuronales qui permet au cerveau de sélectionner spécifiquement l'information pertinente : la majeure partie des données qu'il reçoit est traitée et filtrée inconsciemment ; au sein de ce flux, l'information pertinente est sélectionnée par une opération en trois étapes et diffusée vers les régions associatives du cerveau afin d'être mémorisée. *SR*



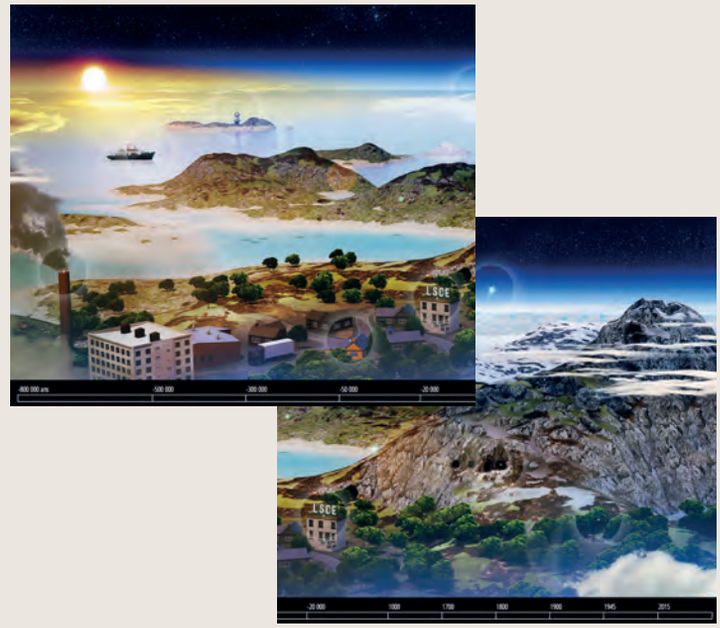
Aperçu de l'activité cérébrale lors de l'étude.

© CEA/Inserm

Stockage de l'énergie

La composition chimique des batteries observée en fonctionnement

Le **Liten** a pour la première fois observé l'évolution de la composition chimique de batteries lithium-ion en fonctionnement par spectrométrie photoélectronique X. Jusqu'à présent, ce genre d'observation nécessitait l'arrêt du test de cyclage et la dissection de la batterie à différents temps de fonctionnement. Ici, un porte-objet spécifique a été développé pour connecter un accumulateur au lithium à un potentiomètre et suivre les changements de structures chimiques aux interfaces électrolyte/électrodes en direct. Les contraintes liées au fonctionnement du spectromètre sous ultravide ont de plus été contournées en utilisant des batteries à électrolytes à base de liquides ioniques, moins sujettes à l'évaporation dans de telles conditions que les électrolytes liquides classiques.
Ce nouveau protocole permettra de mieux comprendre les phénomènes électrochimiques et physico-chimiques en jeu, notamment les mécanismes de dégradation à l'œuvre dans les accumulateurs, et d'en améliorer les performances. *SR*



LE CLIMAT TOUT EN INDICES

Comment connaître le climat passé ? Pour les climatologues, le défi consiste à relier des événements ou périodes climatiques passés à des indices relevés sur Terre ou dans l'atmosphère : sédiments marins et lacustres, coraux, glaces polaires, observation spatiale, cernes d'arbres, mesures atmosphériques… Un vrai travail de détective ! Partagez leur quotidien et leurs aventures, parfois au bout du monde, grâce au Web documentaire *Paroles de climatologues*. D'études en hypothèses, d'analyses en simulations, vous saurez tout sur le climat passé. Chaque étape propose des interviews de chercheurs, des animations pédagogiques, des diaporamas…

Web documentaire CEA. À découvrir sur les espaces Jeunes et Enseignants du Web CEA. www.cea.fr

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.***

QUELLE SOLUTION POUR SAUVER LE CLIMAT ?

La machine climatique est en train de s'emballer dangereusement. Il ne nous reste que trois ans pour inverser la courbe des émissions de gaz à effet de serre si nous voulons éviter aux jeunes d'aujourd'hui un climat auquel il leur serait difficile, voire impossible, de s'adapter. Alors, pourquoi ne pas investir 1 000 milliards, comme pour le sauvetage des banques ? Ce plan financier choc permettrait d'investir massivement pour préserver notre climat et créerait des millions d'emplois. Un vrai pacte finance-climat européen, c'est l'idée audacieuse présentée dans ce livre.

Pour éviter le chaos climatique et financier, Jean Jouzel et Pierre Larrouturou - ***Éditions Odile Jacob. 22 €***

SPATIONAUTE EN BD

Voilà un livre pour tous les âges : le parcours de Thomas Pesquet, croqué avec humour et précision scientifique ! Pourquoi lui ? Comment se prépare-t-il ? Que fait-on dans une station spatiale ? Comment y vit-on ? En 200 pages, l'auteure nous raconte les sept ans d'entraînement du spationaute depuis sa sélection jusqu'à son retour sur Terre. De quoi partager un peu son extraordinaire aventure dans la Station spatiale internationale.

Dans la combi de Thomas Pesquet, Marion Montaigne
Éditions Dargaud. 22,50 €

LA SCIENCE EN 100 INFOGRAPHIES

Big-bang, intelligence artificielle, code génétique, tectonique des plaques, photosynthèse, langage, cerveau, enzymes, virus… Vous trouverez dans cet ouvrage de quoi satisfaire votre curiosité scientifique en images et en explications pédagogiques. Chaque thème est traité visuellement en infographie sur une double page pour une compréhension immédiate, d'un seul coup d'œil.

Eurêka ! : les grandes idées de la science en infographie, Tom Cabot - ***Éditions Dunod. 29 €***

© CEA

Formation

Le Mooc de l'énergie nucléaire en France

Pourquoi se lancer dans les sciences et techniques du nucléaire ? Quelle place pour le nucléaire dans l'économie de demain ? Nucléaire et innovation, est-ce que cela va ensemble ? D'où vient l'électricité qui nous chauffe et nous éclaire ? Voici le type de questions auxquelles vous pourrez répondre après avoir suivi le Mooc « L'énergie nucléaire en France », réalisé par la Sfen, en collaboration avec l'INSTN du CEA. Destiné à un large public ainsi qu'aux étudiants et aux professionnels du secteur nucléaire, le MOOC propose douze modules pour comprendre les enjeux économiques, environnementaux et industriels de l'énergie nucléaire.

Le cours est organisé en six semaines, avec deux modules (divisés en deux niveaux) mis en ligne hebdomadairement, sous la forme de vidéo d'experts durant cinq à dix minutes, et de questionnaires à choix multiples pour évaluer les connaissances acquises. Le niveau 1 nécessite une heure de travail hebdomadaire, et les deux niveaux environ trois heures.

Cours du 5 février au 23 mars 2018
Fin des inscriptions : le 16 mars 2018
www.fun-mooc.fr

Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | **Directeur de la publication** Xavier Clément | **Rédactrice en chef** Aude Ganier | **Rédactrice en chef adjointe** Sylvie Rivière | **Ont contribué à ce numéro :** Clotilde Waltz | **Comité éditorial** Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Hélène Burlet, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi, Camille Giroud et Sophie Kerhoas-Cavata | **Iconographie** Micheline Bayard | **Infographie** Aurélien Boudault | **Photo de couverture** Nasa | **Diffusion** Lucia Le Clech | **Conception et réalisation** www.grouperougevif.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier Satimat, issu de forêts gérées durablement. Galaxy Imprimeurs.

DU 14 DÉCEMBRE 2017 AU 19 AOÛT 2018

EXPO

PASTEUR

Il a vaincu la rage ; dévoilé le monde des microbes ; on lui doit la pasteurisation… Louis pasteur, chimiste de formation, est à l'honneur au Palais de la découverte. Jusqu'au 19 août 2018.

Palais DÉCOUVERTE

L'EXPERIMENTATEUR

Ⓜ FRANKLIN ROOSEVELT Ⓜ CHAMPS-ÉLYSÉES CLEMENCEAU
PALAIS-DECOUVERTE.FR / #EXPOPASTEUR

MINISTÈRE DE LA CULTURE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

AVEC LA COLLABORATION DE
Institut Pasteur