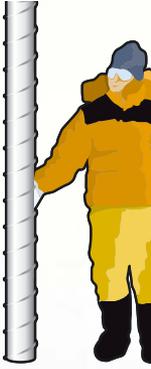


TEMPS FORTS | PAGE 3
Prix Universum 2006 :
le CEA plébiscité

QUOI DE NEUF ? | PAGE 12
Transmutation :
mission Ecix accomplie

TOUT S'EXPLIQUE | PAGE 16
Le thermomètre
isotopique



Le magazine
de la recherche
et de ses applications

n°116

juillet-août 2006

les défis du cea

EPICA

Le

climat

pris dans les

glaces



Au sommaire du n° 116

temps forts

→ temps forts 2

Les actualités du CEA : événements, partenariats, projets...

→ à la une 4

Epica : le climat pris dans les glaces

→ quoi de neuf? 10

- Un contrôle passe-muraille
- Coup de soleil sur l'ADN
- La biopsie d'un coup de baguette
- Mission Ecric accomplie
- Tantale, l'incorruptible
- Tunnel furtif
- Téra 10 explose tous les records
- Cancérologie à la puissance D4
- Des polymères qui ont du muscle

→ tout s'explique 16

Le thermomètre isotopique

→ science partagée 18

Le climat à livre ouvert

→ kiosque 19

À voir, à lire, à écouter autour des sciences...

Titan, microscope électronique en transmission à résolution atomique de toute dernière génération, installé à Minatec.

Minatec, pôle d'innovation

Premier pôle européen d'innovation dans les micro et nanotechnologies, Minatec a été inauguré le 2 juin à Grenoble, en présence de François Loos, ministre délégué à l'Industrie, et d'Alain Bugat, administrateur général du CEA.

© P. Siroppa/CEA

Abonnement gratuit

→ Pour vous abonner aux *Défis du CEA*, merci de nous faire parvenir sur papier libre votre adhésion en mentionnant vos nom, prénom, adresse, code postal et profession à : *Les Défis du CEA*, Bâtiment siège, Direction de la communication, Abonnement, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

LES DÉFIS DU CEA

— Éditeur — Commissariat à l'énergie atomique, R.C.S. Paris B77568 019 — Directeur de la publication — Xavier Clément — Rédactrice en chef — Claire Abou — Rédacteur en chef adjoint — Claude Reyraud — Rédacteurs — Aude Ganier, Franck Gbalou, Frédéric Guérin, Éric Hamonou, Marie-José Loverini, Élisabeth Stibbe, Emmanuel Thevenon, Clotilde Waltz — Comité éditorial — Emmanuel Berthier, Patrick Cappe de Baillon, Véronique Charreyron, Danièle Imbault, Nathalie Manaud, Brigitte Raffray, Frédéric Ravel — Iconographie — Aude Ganier — Infographie — Idé, Dimitri Hadjiyannakis — Photo de couverture — S. Pitamitz/Corbis — Diffusion — Lucia Le Clech — Conception et réalisation — Spécifique - www.specifique.com — Tous droits de reproduction réservés.

Le CEA plébiscité



Deux lauréats des prix Universum : **Éric Gadet**, du CEA (à droite), et **Henri Dufourmantelle**, de Areva (à gauche).

Sacré *Rookie* (nouvelle recrue) de l'année, le CEA a fait une entrée remarquée au palmarès des entreprises les plus plébiscitées par les étudiants scientifiques des universités et écoles d'ingénieurs françaises, qui l'ont classé à la treizième place, juste devant Areva qui partage ce prix. Décerné par le comité Universum, celui-ci classe chaque année les grands employeurs du monde entier. Éric Gadet, chef du service Compétences et parcours professionnel

du CEA, estime que la politique d'accueil des stagiaires de l'organisme et sa participation aux forums étudiants depuis deux ans ont porté leurs fruits.

En chiffres...

Le CEA et l'Espace européen de la recherche

192

→ **projets** financés par la Commission européenne associant le CEA.

45

→ **projets européens** coordonnés par le CEA.

30

→ **millions d'euros** de subventions communautaires accordés par an au CEA depuis 2003.

Pôle de compétitivité

Premier financement pour Trimatec

Chargé de distribuer les crédits des six ministères concernés par les pôles de compétitivité à travers la France, le Fonds de compétitivité des entreprises (FCE) a retenu pour sa première dotation le projet Matcos du pôle Trimatec (Tricastin-Marcoule-Technologies). Associant des organismes de recherche comme le CEA, des industriels et des PME, celui-ci consiste à permettre la synthèse de matériaux grâce aux fluides supercritiques. L'emploi de ces fluides favorise toutes sortes d'opérations de chimie, qui trouvent des débouchés industriels dans les domaines de la pharmacie, de l'énergie et des matériaux avancés.

Hongrie

Collaboration renforcée

L'administrateur général adjoint du CEA, Jean-Pierre Le Roux, et le président de l'Académie des sciences de Hongrie, Szilvester Vizi, ont signé à Budapest un accord dans le domaine de l'énergie nucléaire, des technologies pour l'information et de la santé. Cet accord permettra en particulier d'intensifier la collaboration du CEA avec l'institut de recherche

pour l'énergie atomique KFKI-AEKI, en complément de nombreux projets du 6^e PCRD¹. Ce dernier vise à renforcer les bases scientifiques et technologiques de l'industrie et à favoriser le développement de la compétitivité internationale de l'Union européenne.

1. Programme-cadre de recherche et développement signé entre la Commission européenne et les États membres.

Hall du réacteur 2 de la centrale de Paks, qui produit 35% de l'électricité hongroise.



à la **une**

1995

Année du lancement d'Epica, projet européen de forage de glace en Antarctique.

60 000

échantillons analysés et interprétés, dont un tiers par l'équipe du LSCE.

Il y a 800 000 ans, quel temps faisait-il ? Ou plutôt, quel était le climat ? Au prix de longues expéditions polaires, des scientifiques européens, dont ceux du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)¹, mènent l'enquête. Dans le cadre du projet Epica², ils prennent en filature la glace, indice de la nature assurément le plus bavard... Ils n'hésitent pas à descendre

à - 3 000 mètres pour lui extorquer des aveux sur les grandes variations climatiques, à savoir l'alternance des périodes glaciaires et des périodes chaudes. Les carottes glaciaires sont passées à la loupe et livrent aujourd'hui les températures des 800 000 dernières années. Des informations précieuses qui viennent défier les modélisateurs du climat. Objectif : comprendre

10 pays

investis dans le projet :
Allemagne, Belgique,
Danemark, France, Italie,
Norvège, Pays-Bas,
Royaume-Uni, Suède
et Suisse.

3 mois

Durée d'une mission,
de novembre à janvier,
pendant l'été austral.

-50 °C

Température moyenne
annuelle en Antarctique.

6700 m

Hauteur de glace prélevée
depuis le début du projet
Epica sur ses sites Dôme
Concordia (photo ci-dessous)
et Dronning Maud Land.

© Bios

Le climat pris dans les glaces

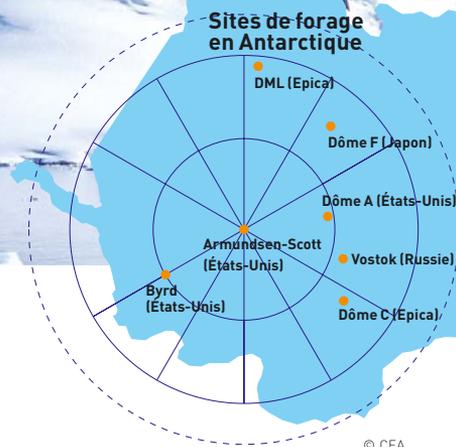
EPICA

Au fil des siècles, le climat laisse des indices emprisonnés dans la glace des pôles. | Le projet européen Epica a pour mission de libérer et de faire parler ces précieux témoins. | Objectif : préciser les modèles climatiques.

la « sensibilité » de la machine climatique, ou découvrir les facteurs déclenchant le début ou la fin d'une ère glaciaire. Si les analyses confirment que les gaz à effet de serre amplifient les changements climatiques, les climatologues ont encore beaucoup d'autres témoins à auditionner ! Décoder les multiples et complexes paramètres du climat est un défi qui appelle de

nouvelles expéditions dans le temps et dans les glaces, et des modèles toujours plus précis pour que la machine climatique tourne rond !

1. Unité mixte de recherche du CEA, du CNRS et de l'université Versailles Saint-Quentin. 2. European project for ice coring in Antarctica.



© CEA

800 000 ans sous les glaces

DOSAGE ISOTOPIQUE

Mesure des concentrations des différents isotopes d'un même élément chimique.

Tout se passe dans l'univers hostile de l'Antarctique, aux sites de forage Dôme Concordia (Dôme C) et Dronning Maud Land (DML), où les climatologues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) affrontent des températures extrêmes pour remonter pas à pas le climat des 800 000 dernières années.

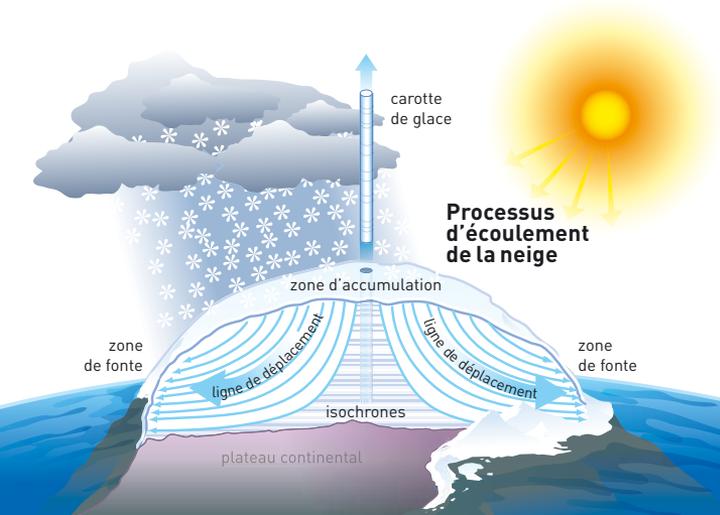
FAIRE PARLER LA GLACE

L'étude de la glace polaire est indispensable en climatologie : l'analyse de l'eau de la glace permet de reconstituer les températures de l'Antarctique, tandis que celle de ses bulles d'air renseigne sur la composition atmosphérique globale. Mais pour exploiter ces données, il faut pouvoir les dater. Ce qui nécessite, dans un premier temps, d'estimer la quantité annuelle d'enneigement basée sur la détection, sur les premiers mètres de la carotte, d'horizons temporels comme les pics de radioactivité issus des essais nucléaires menés

dans les années 1960 ou les poussières d'éruptions volcaniques datées. L'enneigement passé est également évalué à partir du dosage isotopique de l'eau de la glace. La datation repose enfin sur la modélisation de deux phénomènes. D'une part, l'écoulement de la neige, qui provoque le mélange des couches successives (voir schéma ci-dessous). D'autre part, la densification, qui permet d'expliquer que les bulles d'air soient plus jeunes que la glace qui les entoure : « La neige étant un milieu poreux, sa transformation en glace est un processus lent pendant lequel l'air continue de s'infiltrer. Sur des glaces vieilles de 4000 ans, on peut trouver des bulles contemporaines ! », précise Valérie Masson-Delmotte, climatologue au LSCE. C'est en rassemblant toutes ces données que les chercheurs peuvent remonter 800 000 ans au Dôme Concordia, avec une résolution de l'ordre du siècle, et 250 000 ans au DML (site où l'enneigement est plus abondant), avec une analyse affinée sur la dizaine d'années.

LES GRANDES VARIATIONS CLIMATIQUES

Une fois ces marqueurs temporels établis, la glace et les bulles d'air sont interrogées par les spectromètres de masse pour restituer les températures passées. Le dosage isotopique de l'hydrogène présent dans la glace consiste à mesurer sa teneur en deutérium (0,003 % de l'eau de mer), dont on sait qu'elle est d'autant plus faible que la température qui régnait lors des précipitations était froide (voir « Tout s'explique », pp. 16-17). Ainsi, à partir de milliers d'échantillons, la courbe des températures de l'Antarctique se dessine, présentant l'alternance des périodes glaciaires et chaudes tous les 100 000 ans. Ces dernières se révèlent



© D. Hadjiljannakis



© B. Krist/Corbis

« Tout se passe comme si l'hémisphère Nord répondait au Sud, ou inversement... »

instables: nous vivons par exemple depuis 12 000 ans dans une période chaude plus tiède et plus longue que la précédente, il y a 130 000 ans. Des différences confirmées par les analyses d'autres sites de forage en Antarctique¹ et déjà remarquées dans l'étude des **sédiments marins** (autre discipline de la climatologie).

Quant à l'analyse des bulles d'air des carottes de glace, elle livre de précieuses données sur la concentration des gaz à effet de serre (GES) qui y sont présents. Sur 800 000 ans, la courbe de leur évolution s'avère parallèle à celle des températures de l'Antarctique. « À chaque grand cycle climatique correspond une variation des concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄) », note Valérie Masson-Delmotte.

LE RÔLE DES GAZ À EFFET DE SERRE

Cette corrélation met en évidence le rôle des GES comme amplificateurs naturels des variations: par exemple, plus il fait chaud, moins l'océan stocke de dioxyde de carbone, et plus il est concentré dans l'atmosphère, ce qui amplifie le réchauffement. De plus, la comparaison conforte les chercheurs dans le caractère global des informations climatiques issues des glaces de l'Antarctique. Des glaces qui trahissent à la fois des températures locales et la présence des GES dans toute l'atmosphère. Mais si les glaciations sont des phénomènes globaux, leur histoire comporte des

changements brutaux à caractère régional qu'il faut prendre en compte. C'est le cas des variations rapides de la dernière période glaciaire qui apparaissent dans les prélèvements du Groenland, au site de Northgrip, où le LSCE mène également des investigations. Les climatologues ont en effet enregistré des instabilités d'une amplitude de 15 °C environ en quelques dizaines d'années, de loin plus intenses que celles décelées en Antarctique. De même, en comparant les courbes de température des deux extrêmes de notre globe, un décalage temporel systématique est observé, comme si le Nord répondait au Sud, ou inversement... Les analyses d'Epica apportent donc la confirmation du rôle des courants marins dans ce décalage, la circulation océanique agissant en effet comme un transporteur de chaleur (voir encadré p. 9). Et c'est la première fois que

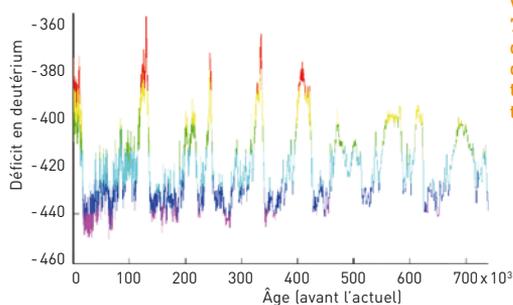
les climatologues peuvent montrer que les bascules Nord-Sud connues pour les plus gros événements antarctiques sont généralisées pendant tous les changements rapides des derniers 50 000 ans. Peut-on pour autant affirmer que ces accidents climatiques sont initiés exclusivement dans l'hémisphère Nord et que

l'on retrouve leurs traces dans le Sud, emprisonnées dans les glaces de l'Antarctique? Quel est leur rôle dans les changements plus lents, tel le passage aux périodes glaciaires? Des questions laissées en suspens, qui poussent les équipes du LSCE à affiner leurs analyses en augmentant leurs résolutions et à repousser les limites du temps pour remonter au-delà du million d'années.

I AUDE GANIER I

1. Des climatologues japonais, russes et américains ont également installé des sites en Antarctique.

SÉDIMENTS MARINS
Dépôts océaniques dans lesquels subsistent des squelettes de micro-organismes, témoins des conditions climatiques passées.



Variation, au cours des 740 000 dernières années, des concentrations en deutérium au Dôme C, traduisant l'évolution des températures.

© Epica



Les climatologues extraient la glace du carottier après forage.

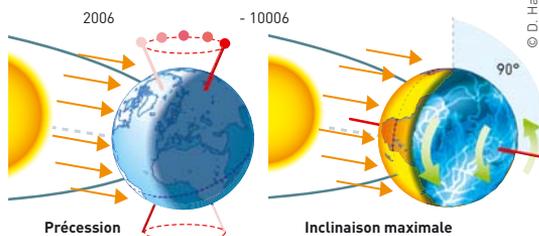
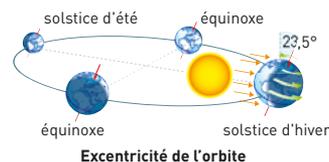
Une planète modèle

« Décrire l'alternance des périodes glaciaires et des périodes chaudes n'est pas tout, il faut maintenant comprendre quels mécanismes engendrent le passage de l'une à l'autre. » Parole de climatologue, en l'occurrence celle de Valérie Masson-Delmotte pour qui, après le temps des résultats scientifiques, vient celui de leur interprétation à l'aide de modèles numériques, développés par d'autres chercheurs du LSCE.

D'un côté, ces modèles restituent les mécanismes du climat ayant trait à la composition et à la circulation de l'atmosphère, à celles de l'océan (voir encadré « La circulation océanique », p. 9), à la végétation, au cycle du carbone¹... De l'autre, ils intègrent tous les facteurs susceptibles de le faire changer, comme les paramètres orbitaux (voir encadré ci-dessous), les éruptions du Soleil qui intensifient le rayonnement solaire sur Terre... La réaction du climat dépend également de phénomènes amplificateurs tels que l'effet d'albédo (voir encadré « L'effet d'albédo », p. 9) ou celui des gaz à effet de serre (GES). La problématique du modélisateur

Les trois paramètres orbitaux

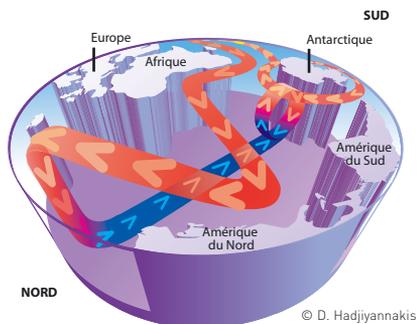
L'excentricité de l'orbite détermine la distance Terre-Soleil. Plus l'orbite est aplatie, plus cette distance est longue, et inversement. Ce paramètre joue sur les contrastes saisonniers et oscille tous les 100 000 à 400 000 ans. **L'obliquité de l'axe de rotation de la Terre** influe sur la différence d'ensoleillement entre les pôles et l'équateur. Plus l'axe est incliné, plus l'équateur se refroidit. Il évolue à un rythme de 40 000 ans. **La précession des équinoxes** modifie la position des saisons sur l'orbite de la Terre pendant un cycle de 19 000 à 23 000 ans. C'est ce paramètre qui a l'effet le plus fort sur les différences d'ensoleillement, jusqu'à 60 W/m^2 , par rapport à une moyenne de 340 W/m^2 .



© D. Hadjyamakis

La circulation océanique

La circulation océanique profonde résulte de l'affrontement de masses aux températures et densités différentes. Les eaux froides, plus lourdes, plongent sous les eaux chaudes plus légères circulant en surface. De même, l'eau salée est plus lourde que l'eau douce. La circulation océanique agit comme un transporteur de chaleur : les courants chauds de surface convoient la chaleur des tropiques vers les pôles. Là, les eaux se refroidissent et plongent pour devenir des courants de fond. Certaines régions, comme l'Atlantique nord, sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques. L'arrivée brutale d'eau douce (issue de la fonte des glaces) modifie la densité des eaux de surface et empêche leur plongée. Cela provoque un ralentissement du « tapis roulant » et un refroidissement régional avec, inversement, une accumulation de chaleur australe, détectée en Antarctique...



L'effet d'albédo

Amplification locale du réchauffement ou du refroidissement, liée aux propriétés réfléchissantes des sols. Lorsque la surface de la planète se couvre de banquise ou de neige, ses surfaces blanches réfléchissent le rayonnement solaire, amplifiant le refroidissement. Inversement, les sols sombres, issus de la fonte des neiges lors d'un réchauffement, absorbent la chaleur.

est alors d'assembler tous ces paramètres et de formuler des hypothèses à partir des observations du terrain. L'une des questions, et non des moindres, soulevées par les résultats d'Epica est de savoir quand et où interviendra la prochaine glaciation. La Terre, qui est dans une période chaude depuis 12 000 ans, n'a en effet toujours pas atteint le seuil minimal d'ensoleillement nécessaire au basculement vers une glaciation. Une curiosité par rapport aux précédentes périodes chaudes qui n'excédaient pas 10 000 ans. De plus, elle ne risque pas de l'atteindre avant 30 000 ans, au vu de ses données orbitales.

Sans compter que, d'après un autre modèle réalisé au LSCE, il existerait un risque que l'on saute la prochaine glaciation si l'émission des GES continue à augmenter de 1 % pendant 150 ans, comme c'est actuellement le cas... Des simulations sans complaisance qui font froid dans le dos!

I A. G. I

Archivage des carottes de glace prélevées dans le cadre d'Epica dans différents laboratoires européens.



1. Voir l'infographie du cycle du carbone dans *Les Défis du CEA 109* ou sur www.cea.fr/defis.htm



Mot à mot

Nommer «carotte» un prélèvement réalisé dans la profondeur immaculée des glaces polaires peut surprendre. S'agit-il d'une allusion à la couleur blanche des premiers spécimens de la racine de cette ombellifère venue du Moyen-Orient ? À moins que «vivre de carottes», autrement dit chichement, soit le lot des chercheurs dont l'un des soucis est d'économiser leurs budgets... La glace étant «l'indice le plus bavard de la nature», ce mot rappelle aussi le vocabulaire des policiers pour lesquels «tirer la carotte» signifie faire avouer. En fait, cette carotte est ainsi dénommée tout simplement en raison de sa forme.

I MARIE-JOSÉ LOVERINI I



quoi de **neuf** ?

Caractérisation des déchets

Un contrôle passe-muraille

Chaque année, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) traite plus de 30 000 colis de déchets provenant d'exploitants nucléaires, de laboratoires de recherche, d'hôpitaux... Des colis dont le niveau de radioactivité doit être vérifié pour déterminer le mode de stockage adapté à chaque **classe de déchets**... Deux équipes du CEA-List¹ et du CEA-Dapnia² optimisent, dans le cadre du projet Inpho³, une méthode de contrôle non destructif⁴ de ces colis par interrogation photonique active (IPA). L'IPA consiste à projeter sur une cible, via un accélérateur, des électrons pour les convertir en photons

ACTINIDES

Éléments radioactifs produits lors de la fission (américium, curium, neptunium...).

de très haute énergie. Ceux-ci pénètrent dans le colis et interagissent avec une fraction des noyaux d'**actinides** qui se désintègrent en émettant des neutrons, lesquels ressortent de la coque. C'est la mesure du nombre de ces particules qui renseigne sur la masse

CLASSE DE DÉCHETS

Il existe quatre catégories de déchets : ceux de haute activité à vie longue (HA), de faible activité à vie longue (MA), de faible activité à vie courte (FA) et de très faible activité (TFA).

des actinides présents dans le colis, voire sur leur répartition grâce à une image obtenue à partir d'un examen « tranche par tranche » et sous différents angles (tomographie).

Aujourd'hui, les chercheurs parviennent à déceler jusqu'à 0,85 gramme d'actinides par tonne de déchets, une limite qui correspond à celle d'un déchet de faible activité. Cette performance mène à une deuxième étape, qualitative : pouvoir distinguer entre les différentes espèces d'actinides dont le niveau de radioactivité varie, et ainsi convertir la masse détectée en activité. Des résultats très attendus pour une caractérisation non destructive encore plus fine.

| AUDE GANIER |



RETROUVEZ SUR www.cea.fr/defis.htm
une infographie animée de l'interrogation photonique active.

NOTES : 1. Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies. 2. Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée. 3. Interrogation par photofission : programme consistant, grâce à des simulations et des expérimentations, à optimiser l'accélérateur et le dispositif de mesure. La direction de l'énergie nucléaire en assure le financement. 4. Méthode respectant l'intégrité du colis, par opposition au contrôle destructif impliquant un prélèvement d'échantillon (non représentatif du colis), et donc la production de déchets.

Coup de soleil sur l'ADN

Gare aux expositions abusives au soleil !

En effet, ses rayons ultra-violet (UV) peuvent provoquer des dommages sur la double hélice de l'ADN, entraînant des lésions cancéreuses. Une équipe du Laboratoire Francis-Perrin¹ au centre CEA de Saclay vient d'apporter un éclairage sur la toute première étape d'une cascade de processus

conduisant à ces lésions. Les mesures d'absorption et de fluorescence réalisées à l'aide d'impulsions laser UV ultracourtes montrent que, exposées à la lumière, les bases de l'ADN, qui constituent l'alphabet du **code génétique**, ont un comportement fortement collectif. Contrairement à l'idée reçue, un photon n'est pas absorbé par une seule base, mais simultanément par un certain nombre d'entre elles. Puis, en moins de 100 femtosecondes², l'énergie reçue est redistribuée à d'autres groupes de bases. Autre comportement collectif découvert par cette équipe : les bases s'oxydent plus faci-

lement lorsqu'elles se trouvent au sein d'une molécule d'ADN que lorsqu'elles sont isolées. Ainsi, loin de protéger l'ADN, sa structure en double hélice favoriserait des réactions impliquées dans la formation des

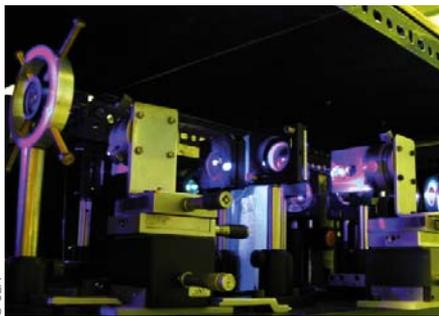
lésions cancéreuses. Comment cette formation est-elle influencée par ces effets collectifs ? La question reste ouverte.

Les crèmes solaires ont encore de beaux jours devant elles... | CLAUDE REYRAUD |

CODE GÉNÉTIQUE

Par groupes de trois, les quatre bases de l'ADN – l'adénine, la thymine, la guanine et la cytosine – constituent les unités codantes pour la fabrication des protéines.

Les impulsions laser ultracourtes permettent d'étudier l'absorption des UV par la double hélice de l'ADN.



Chirurgie

La biopsie d'un coup de baguette

Protocool annoncerait-il la réhabilitation des biopsies ?

Cet outil mis au point par des chercheurs du CEA-Léti³ permet, sans prélèvement de fragment d'organe, de réaliser des diagnostics. Ce bâtonnet de silicium, de 0,5 à 1,5 cm de long et d'un demi-millimètre de large, a été nanostructuré par gravure afin d'augmenter sa surface de contact.

Il agit comme un ruban adhésif en retenant les protéines de surface de l'organe sur lequel il a été appliqué grâce à un guide métallique. Sa composition chimique peut, de plus, être adaptée de manière à faciliter l'absorption de certaines protéines, comme des marqueurs cancéreux. Les éléments ainsi prélevés peuvent être analysés directement, sans préparation préalable, en insérant simplement l'extrémité de Protocool dans un spectromètre de masse. Très avantageuse pour le patient, puisque minimalement invasive (diamètre d'une aiguille de seringue), mais également très sélective et facile d'utilisation, cette nouvelle technique de biopsie pourrait donner lieu à des applications de diagnostic en cancérologie. Elle pourrait également être utilisée pour réaliser des explorations cérébrales en toute délicatesse.

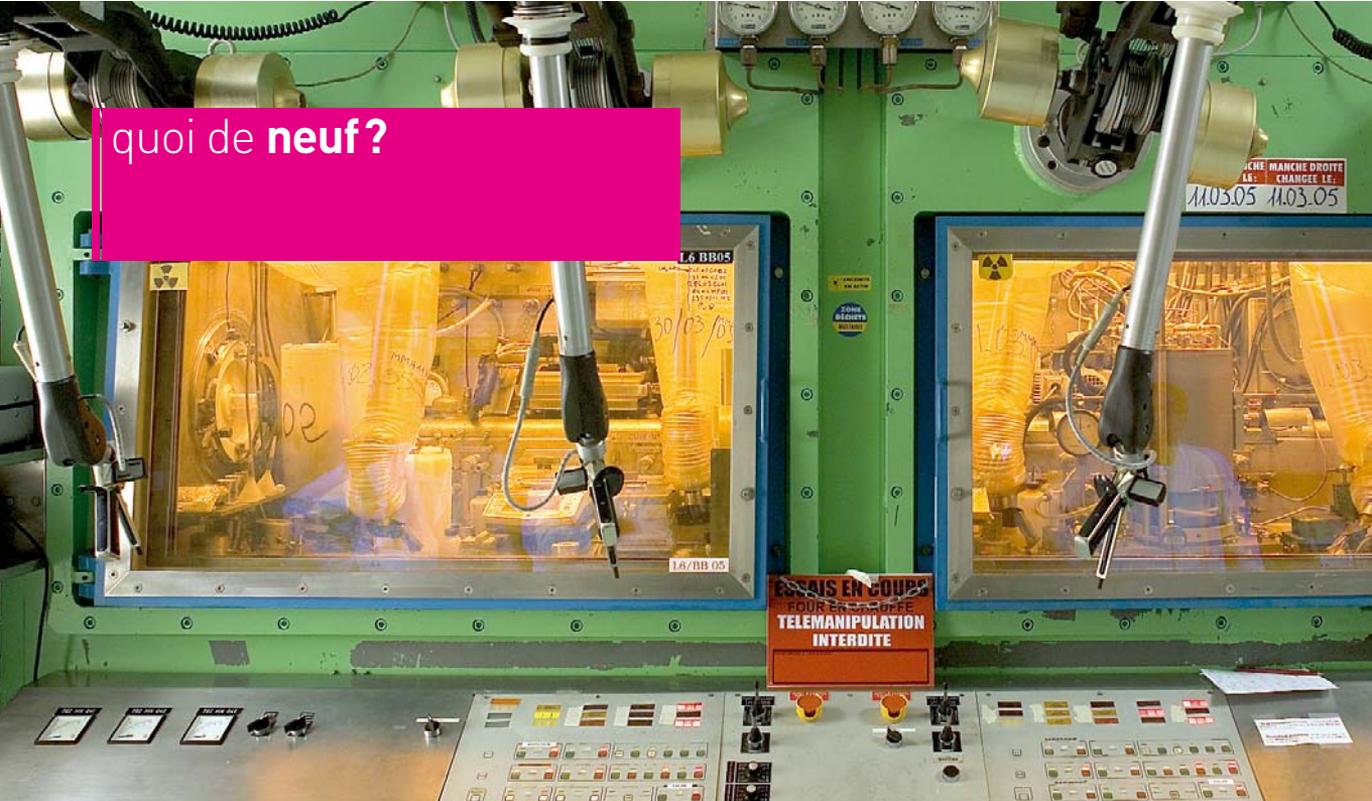
| CLOTILDE WALTZ |



La structure nanostructurée de cet outil de biopsie permet de prélever les protéines de surface des organes.

1. Unité associée aux CNRS-CEA/DSM/Drecam/Spam (URA 2453). 2. 10 milliardièmes de milliardième de seconde (10^{-13} s). 3. Laboratoire d'électronique de technologie de l'information.

quoi de neuf ?



Vue d'une cellule blindée où sont fabriquées les cibles de l'expérience Ecrix.

Transmutation

Mission Ecrix accomplie

Une nouvelle étape vient d'être franchie dans la maîtrise de la transmutation des actinides mineurs¹. Il s'agit de réaliser dans un réacteur nucléaire une cascade de réactions pour transformer ces éléments radioactifs à vie longue, présents aujourd'hui dans les déchets issus des combustibles nucléaires usés, en éléments stables non radioactifs ou à vie courte. De janvier 2003 à janvier 2006, s'est en effet déroulée

avec succès l'expérience Ecrix, qui consistait à transmuter, au sein du réacteur à neutrons rapides Phénix, un actinide mineur, l'américium, contenu dans des cibles en magnésie. Cette expérience, conçue par le Département d'études des combustibles (DEC) et le Département d'études des réacteurs (DER) du centre CEA de Cadarache, a utilisé des cibles fabriquées dans les laboratoires d'Atalante sur le centre

CEA de Marcoule. De plus, pour la première fois, une opération de ce type a été effectuée dans un réacteur couplé au réseau.

« L'expérience, explique Syriac Béjaoui, du Laboratoire de conception et d'irradiations de combustibles innovants au sein du DEC, a consisté à irradier un combustible constitué des particules d'oxyde d'américium fixées dans une matrice inerte de magnésie selon la mode hétérogène². »

L'ensemble formait une colonne composée de 32 cibles cylindriques, disposée dans un assemblage d'anneaux d'hydrure de calcium conçu spécialement pour ralentir localement la vitesse des neutrons, ce qui favorise la transmutation de l'américium.

Après trois ans d'irradiation, l'aiguille a été retirée du réacteur et mise en refroidissement pour huit mois.

90 %
de l'américium devraient s'être transmutés au bout de trois ans, dont 35 % par fission.

NOTES : 1. Famille d'éléments radioactifs présents dans le combustible nucléaire usé. 2. Les actinides mineurs sont concentrés dans des cibles disposées dans le réacteur. Dans le mode homogène, ils sont dispersés en faible quantité dans le combustible nucléaire. 3. Laboratoire d'Atalante, Centre CEA de Marcoule, Laboratoires d'examen des combustibles actifs et d'étude des combustibles irradiés du centre de Saclay, ainsi que la Station de traitement et d'assainissement et de reconditionnement du Centre CEA de Saclay.



© A. Gomin/CEA

Procédés industriels

Tantale, l'incorruptible

Le tantale, métal rare et cher, résiste à la plupart des acides. Pratiquement inerte, il est le matériau idéal pour tout objet soumis à d'intenses agressions chimiques. Le Département matériaux (LR/DMAT) du CEA a mis au point un nouveau procédé permettant de réaliser des revêtements de tantale en couche mince, mais dense, sur des surfaces complexes. La technique consiste, grâce à un jet supersonique, à propulser à grande vitesse les particules de ce métal sur les éléments à traiter. C'est l'énergie du choc qui soude ces grains entre eux. De tels revêtements donnent à moindre coût les caractéristiques anticorrosion du tantale à des matériaux plus classiques. Ce procédé pourra être utilisé pour recouvrir et protéger des composants très exposés, comme ceux utilisés notamment dans l'industrie chimique ou l'aérospatiale. | **ÉRIC HAMONOU** |



© CEA

Enceinte d'application du spray tantale.

Plusieurs laboratoires³ du CEA analyseront ensuite en détail son évolution subie en réacteur (caractérisation physique, chimique et isotopique, microstructurale...). Selon les calculs, environ 90 % de l'américium que contenait l'aiguille devraient s'être transmutés, dont 35 % par fission.

Les analyses à venir permettront, d'une part, de statuer sur l'atteinte des niveaux de transmutation et de fission visés et, d'autre part, d'acquérir des informations de première importance en vue de la qualification de la magnésie comme matrice inerte (évaluation du gonflement sous irradiation, de l'évolution de la conductivité thermique...) pour la transmutation d'actinides.

| **EMMANUEL THEVENON** |

L'équipe du Drecam soumet ces couches optiques à des impulsions laser ultracourtes (femtoseconde).

Physique théorique

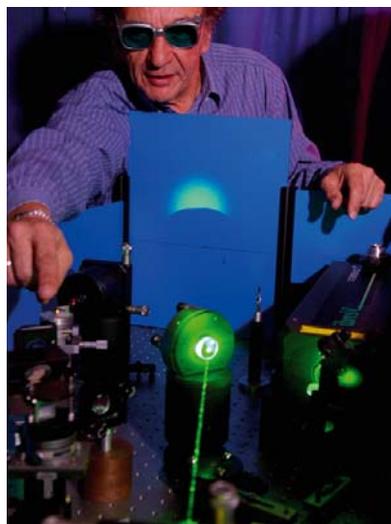
Tunnel furtif

Plus vite que la lumière ? Selon une hypothèse, les photons capables de traverser par effet tunnel un matériau

peu épais – jusqu'à quelques dizaines de nanomètres – pourraient, dans certains cas, dépasser la vitesse de la lumière. Or, ce seuil était jusqu'ici considéré comme infranchissable. C'est ce que nous révèle une étude théorique menée au Drecam¹ sur la propagation au travers de couches optiques minces,

dont l'indice de réfraction varie de façon continue². En plus d'infirmar cette hypothèse, l'étude a aussi montré que, si les paramètres de ce « gradient continu d'indice » sont correctement choisis, tous les photons peuvent traverser la couche, un cas assimilable à un effet tunnel total : toute réflexion de la lumière aux interfaces de la couche est ainsi annulée. Fabriquées à base d'oxygène, d'azote et de silicium, ces couches pourront, grâce à cette étude, être utilisées dans la lunetterie (antireflet) et dans le domaine de la furtivité. | **FRANCK GBALOU** |

EFFET TUNNEL
Principe de mécanique quantique qui permet à une particule, même dotée d'une énergie insuffisante, de franchir la barrière que constitue une couche en passant au travers, comme si elle empruntait un tunnel (voir *Défis* du CEA 115, p. 12).



© J. Cantin/CNRS

1. Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules. 2. À l'inverse des traitements multicouches classiques, qui consistent en un empilement où chaque couche est métallique et d'indice constant.

Supercalculateur

Téra 10 explose tous les records

Téra 10 bat des records dès ses premiers tests. Mis en service en février¹, le supercalculateur du centre CEA-Dam² Ile-de-France réalise une simulation exceptionnelle: la propagation atmosphérique en trois dimensions d'ondes infrasonores sur une région grande comme huit fois la France et jusqu'à une altitude de 200 km. Cette étude est réalisée dans le cadre de la surveillance du Traité d'interdiction

complète des essais nucléaires (TICE). Ce volume était découpé en 10 milliards de mailles autorisant une finesse de détail de 400 mètres. Du jamais vu ! Le problème est d'autant plus complexe que les vents modifient la direction des infrasons au point de rendre très difficile la détermination de leur origine. À l'inverse des sons audibles (de 20 Hz à 20 kHz), rapidement absorbés par la viscosité de l'air et des matériaux qu'ils rencontrent, les infrasons – ici d'une fréquence de l'ordre de un dixième de hertz – sont capables de contourner les obstacles

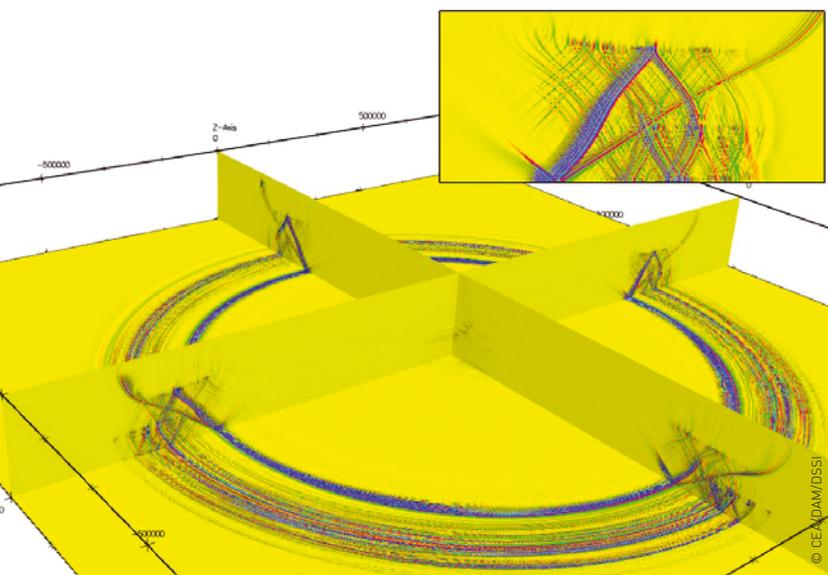
et de se propager sur de très grandes distances. Le modèle était basé sur les données recueillies lors d'une explosion chimique expérimentale non nucléaire réalisée en 1987 au Nouveau-Mexique (États-Unis) et pour laquelle le CEA avait été partenaire,

fournissant notamment les capteurs d'infrasons. Pour ce test, Téra 10 devait reproduire une explosion similaire. Il a ainsi fallu 10 heures à 1936 de ses 8704 processeurs Intel Itanium pour simuler une heure de progression des infrasons engendrés par une telle explosion. Dans un deuxième temps, il sera possible de tenir compte des reliefs et de la rotondité de la Terre.

À terme, ces résultats permettront de déterminer la nature et la localisation précises, à plus de 1 000 km, de l'explosion qui a généré les infrasons enregistrés. Lors de ce test, le supercalculateur a atteint le rythme soutenu de 6 téraflops : six mille milliards d'opérations numériques à la seconde. « *Un chiffre d'excellent augure* », souligne Hervé Jourden, responsable du projet. La configuration finale de Téra 10 réalisera 20 téraflops en routine et 55 téraflops en pics.

| FRÉDÉRIC GUÉRIN |

HERTZ
Fréquence correspondant à une oscillation par seconde : 1/10 Hz correspond à une oscillation toutes les dix secondes.



Modélisation de la propagation des infrasons suite à une explosion simulée (intersection des trois plans). Les couleurs traduisent l'intensité des infrasons.

NOTES : 1. Téra 10 a été livré par la société Bull en décembre 2005 au centre CEA-Dam Ile-de-France. 2. Direction des applications militaires.

Nanomédecine

Cancérologie à la puissance D4

Dans la famille « aptamère », on demande D4... En effet, D4 est le nom d'un nano-objet que viennent de mettre au point des chercheurs du CEA pour lutter contre certains types de cancer. Comme tous les aptamères, il s'agit d'un court acide nucléique doté de propriétés

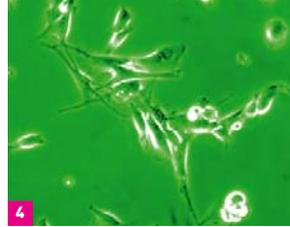
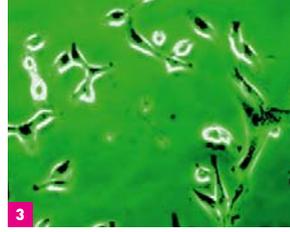
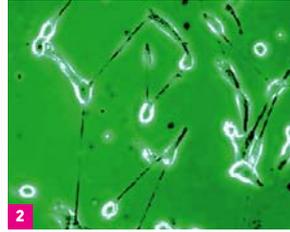
ACIDE NUCLÉIQUE

Famille de molécules, à laquelle appartient l'ADN et l'ARN, constituées d'une séquence de nucléotides (association d'un sucre, d'un phosphate et d'une base azotée).

analogues à celles des anticorps. Ici, la molécule a été sélectionnée par une méthode originale d'évolution moléculaire à partir d'une population d'acides nucléiques artificiels, pour répondre à deux critères : être capable de se fixer à la protéine Ret, présente dans la membrane des cellules et impliquée, entre autres, dans l'apparition de certains cancers (notamment des cancers de la thyroïde), mais surtout, être capable de conserver cette propriété *in vivo*.

Le succès est au rendez-vous. Au terme de plusieurs cycles de sélection/réplication, les scientifiques se sont aperçus qu'un de leurs nano-objets avait non seu-

lement la capacité de se fixer aux cellules malades, mais que cette fixation avait pour conséquence d'inverser le processus de cancérisation ! Brevetée, la molécule pourrait être commercialisée en France comme outil de diagnostic ou comme agent thérapeutique. | c. w. |



L'expression, par des cellules (1), de gènes impliqués dans le développement des tumeurs induit un changement de leur forme (allongement) (2). Lorsque l'aptamère D4 est incubé à la surface de ces cellules, elles reprennent leur forme initiale (3). Cette transformation est validée par une vue de contrôle (4).



Matériaux

Des polymères qui ont du muscle

Flexion, extension ! Il ne s'agit pas ici de muscles mais de polymères capables de se déformer... L'astuce consiste à appliquer une tension électrique au sein du polymère pour qu'il change de forme, reproduisant ainsi l'élongation et même la force d'un muscle. Grâce à cette technologie brevetée par des ingénieurs

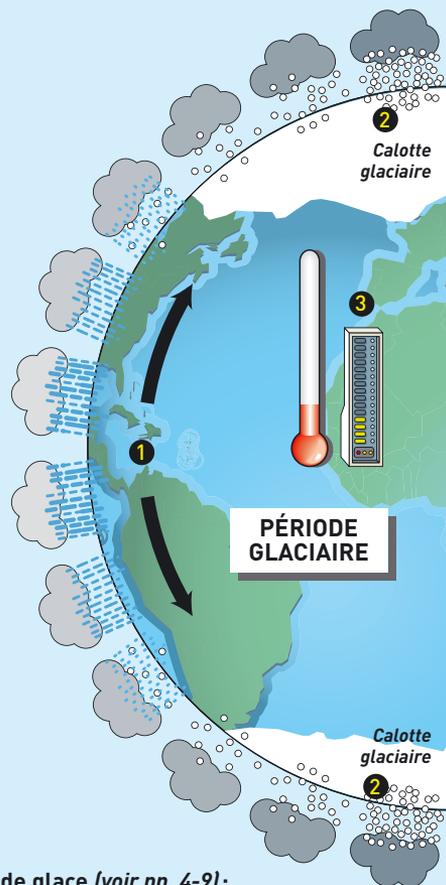
du CEA-List¹, de nombreuses applications sont envisagées, de la conception de nouvelles prothèses aux systèmes de rééducation² en passant par les interfaces sensorielles et à retour d'effort. Les prototypes ont été développés sur deux types de polymère : électronique et ionique, sur lesquels sont déposées des électrodes. La déformation des premiers est due à celle des électrodes sous l'effet du champ électrique qui leur est appliqué. Quant aux seconds, leur forme varie en fonction du déplacement d'ions (dû à la tension électrique) vers les électrodes, à l'intérieur du polymère. Les performances de ces deux dispositifs ont été évaluées³ et présentent des résultats encourageants en termes de temps de réaction et de force générée. Ce muscle artificiel améliorerait la légèreté et la maniabilité des interfaces. Et la réalité virtuelle se rapprocherait encore plus de la réalité.

| A. G. |

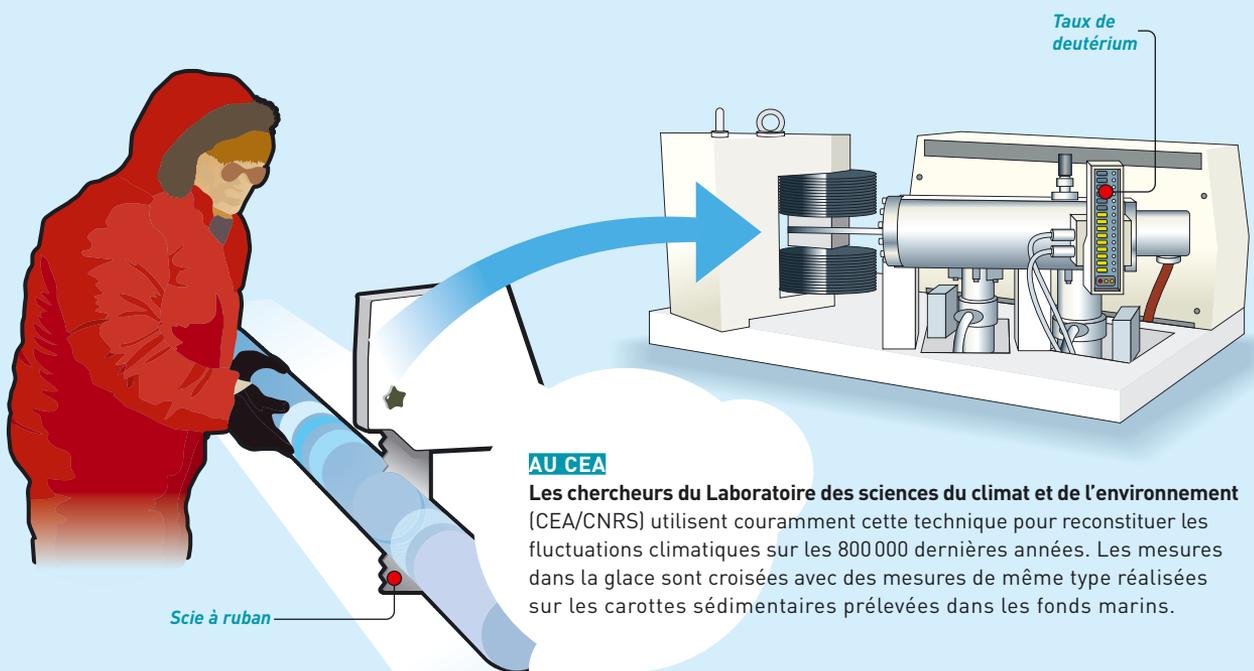
1. Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies. 2. Par exemple, un polymère tubulaire d'un diamètre de 1 cm installé sur le bras d'un patient lui permet de soulever des charges jusqu'à 2 kg. 3. Les polymères électroniques nécessitent une tension élevée (de l'ordre du kV) quand quelques volts suffisent à la déformation des polymères ioniques.

Pour prendre la température qui régnait il y a 3 000 ou 800 000 ans, l'une des méthodes consiste à doser des isotopes de l'hydrogène contenus dans les carottes de glace. Focus sur ce « thermomètre isotopique », très prisé des climatologues...

Le thermomètre isotopique

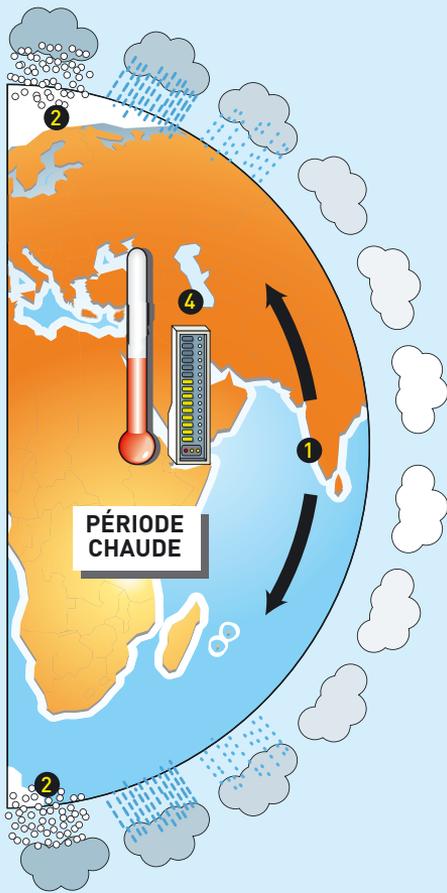


LE PRINCIPE | Une échelle de temps est déterminée le long des carottes de glace (voir pp. 4-9) : celles-ci sont découpées en échantillons d'une cinquantaine de centimètres de long. Puis, dans chacune de ces « tranches », les taux des isotopes ^1H et ^2D (deutérium) de l'hydrogène sont mesurés grâce à un spectromètre de masse : plus le rapport $^2\text{D}/^1\text{H}$ est faible, plus les températures régnant durant la période correspondante étaient basses.

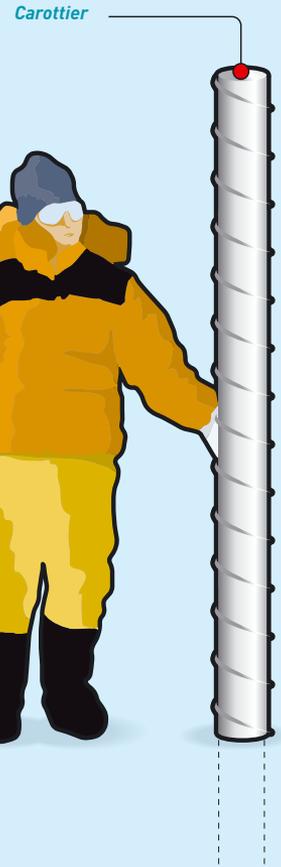


AU CEA

Les chercheurs du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS) utilisent couramment cette technique pour reconstituer les fluctuations climatiques sur les 800 000 dernières années. Les mesures dans la glace sont croisées avec des mesures de même type réalisées sur les carottes sédimentaires prélevées dans les fonds marins.



Les masses d'air humide migrent des tropiques vers les pôles **1**. Au cours de ce déplacement, elles se refroidissent et subissent ainsi des condensations successives à l'origine des précipitations. Aux pôles, ces dernières (pluie ou neige) sont conservées sous forme de glace **2**. En période glaciaire, les précipitations sont plus nombreuses et surviennent plus tôt au cours de la migration des masses d'air. Ainsi, plus celles-ci s'approchent des pôles, plus elles s'appauvrissent en deutérium : les glaces formées aux pôles seront d'autant plus « allégées » en deutérium que les températures étaient basses **3**. En période chaude, les précipitations surviennent plus tard et sont moins nombreuses. Les glaces polaires seront alors plus chargées en deutérium **4**. Cette relation de proportionnalité permet de reconstituer les températures du passé. C'est le thermomètre isotopique.

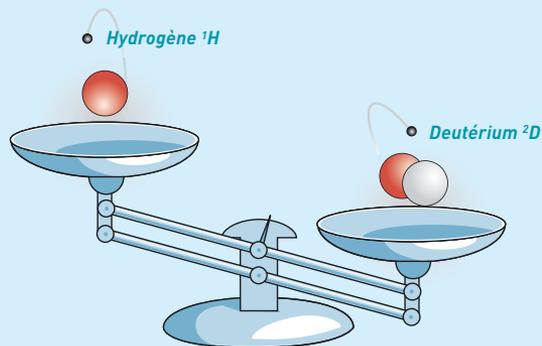


DEUTÉRIUM ET HYDROGÈNE

Dans la mer, sur un million de molécules d'eau (H_2O), la quasi-totalité (99,7 %) est de l'eau légère constituée de l'isotope d'hydrogène 1H . Le reste, de l'eau lourde, contient l'isotope d'hydrogène 2D (deutérium). C'est sur les différences de masse de ces isotopes que les climatologues s'appuient pour déduire les températures du passé. En effet,

avec 1 neutron de plus, 2D est plus lourd que 1H . Les molécules d'eau des nuages contenant du 2D se condensent plus efficacement que celles constituées

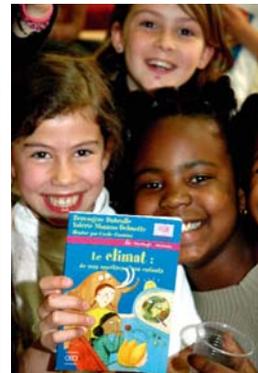
uniquement de 1H . Les précipitations contiennent donc toujours plus de molécules d'eau lourde que l'eau qui subsiste sous forme de vapeur.



LES ISOTOPES

Un atome (hydrogène, carbone, oxygène...) possède plusieurs isotopes : leurs noyaux ont tous le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. Ils ont les mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés physiques différentes, notamment la masse.

RETROUVEZ SUR www.cea.fr/defis.htm
l'animation du fonctionnement d'un thermomètre isotopique.



Coup de chaud | Deux lampes, deux thermomètres et deux pots de confiture remplis de terre suffisent pour dénoncer l'effet d'un film plastique simulant une bonne couche de gaz à effet de serre. « *Au secours, ça chauffe!* », s'exclame Arthur qui surveille la montée des températures.

© Claude Reyraud/CEA

Le climat à livre ouvert

Comment influençons-nous le climat? C'était la question débattue par la classe de CMI de l'école Damesme à Paris dans le cadre d'un « Malabar des sciences ». Au programme des activités organisées en partenariat avec le CEA : création de posters, exposés, expériences scientifiques et goûter-rencontre avec Valérie Masson-Delmotte¹, spécialiste du climat et co-auteur avec Bérangère Dubrulle d'un petit livre² sur un sujet qui déchaîne les passions. Les questions pleuvent sur la chercheuse : « *Pourquoi peint-on les maisons en blanc en Espagne?* », « *Comment marche un climatiseur?* », « *Pourquoi le climat change tout le temps?* ». Sylvie Chenu, l'institutrice, n'a pas ménagé ses efforts pour mobiliser sa classe. Sans doute est-elle elle-même une passionnée d'environnement...

| CLAUDE REYRAUD |

1. Chercheuse au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE CEA/CNRS). 2. *Le climat : de nos ancêtres à nos enfants*, Éditions Le Pommier, 2005.



La science en couleurs | Noire comme le goudron, la feuille chauffe au soleil : Vincent compare de ses mains les effets des couleurs. « *Mais alors, la neige en hiver, ça refroidit encore plus!* », remarque Nadia en mangeant son goûter. « *Et moins il y a de neige, plus le climat se réchauffe* », ajoute Valérie Masson-Delmotte.

kiosque

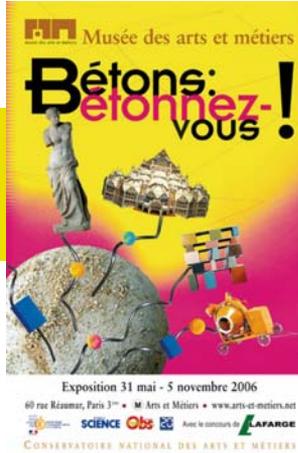


Astronomie pour petits et grands

DU 12 AU 18 AOÛT |
À FLEURANCE
DANS LE GERS

Grande nouveauté, cette année! Parallèlement à la 16^e édition du festival d'astronomie, se déroulera le premier festival Astro jeunes entièrement destiné aux enfants de 4 à 17 ans. Préparé en étroite collaboration avec une équipe de chercheurs (Sylvain Chaty, Roland Lehoucq, Nathalie Palanque...), et parrainé par Hubert Reeves, le festival de Fleurance est un rendez-vous incontournable, pour apprendre et pratiquer l'art d'observer et de comprendre notre univers sous toutes ses formes.

Pour en savoir plus :
www.fermedesetoiles.com



Une expo bétonnante !

DU 31 MAI AU 5 NOVEMBRE |
MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS |
PARIS III^e

L'exposition présente sans contester la collection la plus insolite d'objets historiques et contemporains sur le béton, le plus décrié des matériaux. Elle concerne autant le grand public, que l'artiste ou le professionnel du secteur. Elle explique que le béton, fruit des prodigieuses avancées technologiques, apporte à l'architecture un potentiel créatif jusqu'ici inimaginable, dans le cadre du développement durable.

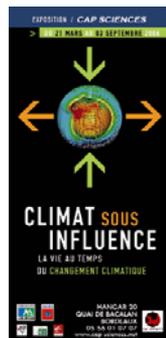
Musée des Arts et métiers | 60, rue Réaumur | Paris III^e

À la poursuite des monstres marins

CITÉ DE LA MER | CHERBOURG |
DU 28 MARS AU 27 AOÛT

La Cité de la mer propose à un public familial et scolaire (enfants à partir de cinq ans) une exposition-spectacle : « À la poursuite des monstres marins, une aventure d'Indiana Kraken ». Ce grand voyageur nous entraîne dans une aventure au cœur des océans, à la poursuite d'étranges créatures marines, réelles ou mythiques. Animée par un comédien, l'exposition s'inspire des récits de *Moby Dick* ou de *Pinocchio*, une façon originale de redécouvrir les fonds marins.

La Cité de la mer | Gare maritime transatlantique | 50100 Cherbourg



Mode de vie et climat, une exposition sur un couple inséparable

JUSQU'AU 3 OCTOBRE | BORDEAUX

Cap Sciences présente, en partenariat avec l'Ademe, une exposition sur le thème « Mode de vie et climat ». Sur environ 200 m²,

elle invite un large public à prendre conscience de l'impact de notre vie quotidienne sur le climat, à réagir et modifier certaines de nos habitudes. Animée par des installations multimédias, des conférences et des forums de discussion, cette exposition voyagera dans toute la France.

Cap Sciences | Hangar 20 | Quai de Bacalan | 33300 Bordeaux

QUE VOUS
SUGGÈRE
CETTE IMAGE ?

- a_ Plasma dans le réacteur de fusion Tore Supra
- b_ Parois internes d'un puits de forage de glace
- c_ Effet Cherenkov dans des cristaux de glace

Il s'agit des parois internes d'un puits de forage en Antarctique, où les chercheurs du CEA effectuent des prélèvements pour connaître les climats passés. La lumière violette résulte de la pénétration des rayons solaires dans la glace, les bulles d'air agissant comme un filtre optique. Dépendant de la position du Soleil, cette lumière varie entre le bleu, le matin, et le violet, le soir.

