

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

233

Décembre 2018

Janvier 2019

TOUT
S'EXPLIQUE

Supplément détachable
sur le système
international
d'unités
(SI)

02

L'INTERVIEW

◆ Gilles Ramstein et Cyril Caminade explorent l'impact du changement climatique sur les zones de paludisme grâce à leurs modèles de simulation numérique ◆

04

ACTUALITÉ

◆ Le CEA débarque au CES de Las Vegas ◆ Étape majeure pour la commercialisation du pancréas artificiel de Diabeloop ◆ Le CEA s'expose à Supercomputing ◆ Au service de la sécurité sanitaire avec l'Anses ◆ Evoc : enseigner dans un réacteur en réalité virtuelle ◆ Imec et le CEA, en bonne intelligence... artificielle ! ◆ Le Haut-conseil pour le climat ◆

08

SUR LE VIF

◆ Soleil fait la lumière sur du combustible irradié ◆ De l'Esprit dans l'autopartage ◆ Un réservoir d'hydrogène à toute épreuve ◆

12

DOSSIER

◆ Métrologie ◆

20

SCIENCES EN BREF

◆ Des nanobalances pour peser les virus ◆ Les panneaux solaires de Stratobus™ tiennent la route ◆ Autisme, un éclairage inédit grâce à l'IRM ◆ Les convertisseurs montent en puissance ◆ CO₂ : un rôle majeur dans l'englacement du Groenland ◆ Reproduire la convection thermique stellaire ◆ Mieux vaut une sphère qu'un tube ◆ Récupérer l'énergie du débit de l'eau ◆

23

KIOSQUE

www.cea.fr



Métrologie

2 poids, 2 mesures !

Cyril Caminade

Épidémiologiste et climatologue
à l'université de Liverpool

Gilles Ramstein

Climatologue au LSCE



Quand les données climatiques prédisent les pandémies futures...

Et si la calotte glaciaire du Groenland fondait plus vite que prévu ? Ce scénario, malheureusement plausible, induirait de profondes modifications sur la mousson africaine, et probablement, le déplacement des zones de paludisme. C'est ce couplage entre climatologie et épidémiologie qu'étudient Gilles Ramstein et Cyril Caminade, au sein du projet Epiclim de DRF-Impulsion.

Propos recueillis par Sylvie Rivière

En quoi consiste le projet Epiclim ?

Gilles Ramstein : Nous examinons les effets d'une fonte accélérée des glaces du Groenland sur la répartition des zones de paludisme, et donc sur la santé des populations, sur tout le XXI^e siècle. Il s'agit d'un sujet à la croisée de nos disciplines respectives : la **paléoclimatologie** pour ma part et l'épidémiologie, en particulier la prévision de la dispersion des maladies vectorielles, pour Cyril.

Cyril Caminade : Coupler la climatologie aux modèles de dispersion de vecteurs pathogènes

permettrait de mieux comprendre, d'anticiper, et donc potentiellement de mieux contrôler les pandémies futures. C'est un sujet important en terme de santé publique.

Comment ce projet est-il né ?

G.R. : Nous pensons que la **calotte** arctique pourrait disparaître beaucoup plus vite que prévu, parce qu'elle fond par à-coups, et non de manière linéaire. Ce phénomène constitue d'ailleurs l'une des plus grandes incertitudes sur la prévision de l'évolution du climat à la fin du siècle, pointée dans les rapports du **Giec**. Or, une fonte accélérée des glaces du Groenland pourrait entraîner d'énormes changements climatiques, comme nous l'enseigne l'histoire du climat. Cette piste doit donc être sérieusement explorée, au delà des prévisions du Giec. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à ce scénario, dit « de rupture ».

Quels seraient ces changements climatiques ?

G.R. : La très grande force des paléoclimatologues est que nous disposons de centaines de milliers d'années de données. Nous savons ainsi que la fonte de la calotte glaciaire dans l'hémisphère Nord est un facteur déterminant pour la

mousson africaine. Dans le passé, chaque grande débâcle d'iceberg a abouti à l'effondrement de la mousson en Afrique de l'Ouest et à son déplacement vers le Sud. Pourquoi ? Parce que les très grandes quantités d'eau douce et froide déversées dans l'Atlantique Nord modifient profondément la circulation océanique et dérèglent le système climatique : les zones de pression et donc les bandes de pluie se décalent vers le Sud. Cette mécanique est très robuste, quelles que soient les échelles de temps. Est-ce que l'on aurait le même type de phénomène si la glace du Groenland fondait un peu tout au long du XXI^e siècle ? La réponse est oui. Ce scénario induirait des réorganisations massives de la circulation atmosphérique et des moussons dans des zones tropicales africaines où habitent des centaines de millions de personnes.

Que disent les rapports du Giec sur l'évolution des moussons dans le siècle à venir ?

G.R. : Le Giec définit un certain nombre de scénarios standards d'émissions plausibles de CO₂, que la communauté scientifique internationale introduit dans ses

Note :
1. Le LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) fait partie de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace).

modèles d'évolution du climat. Or, l'augmentation du CO₂ ne donne pas une signature très robuste sur l'évolution de la mousson. Selon les modèles, la mousson augmente, diminue ou encore se déplace. En revanche, la prise en compte des gradients d'énergie dans l'Atlantique Nord, modulés par la fonte des glaces arctiques, donne une réponse très robuste sur l'évolution de la mousson africaine. C'est ce que nous faisons.

Comment est venue l'idée d'associer les conséquences de la fonte des calottes glaciaires à l'épidémiologie ?

G.R. : Nos simulations montraient le lien entre la fonte de la calotte glaciaire arctique et l'effondrement de la mousson ouest africaine ; et des impacts majeurs sur l'agriculture, notamment sur les cultures de céréales, poussant les populations à se déplacer. C'est à ce moment que j'ai rencontré Cyril, épidémiologiste, pour nous aider à déterminer les nouvelles cartes de distributions des vecteurs de maladies, comme les moustiques, poussés eux aussi vers des régions propices à leur développement.

On sait aujourd'hui faire le lien entre le changement climatique et les épidémies ?

C.C. : Les projections climatiques sont en effet importantes pour prédire, via des modèles de simulation numérique, l'évolution des niches écologiques des vecteurs de maladies. Nous avons déjà regardé l'impact des scénarios standards de réchauffement climatique du Giec sur l'ensemble des maladies vectorielles. Concernant le paludisme, nos simulations montrent une montée du risque sur les plateaux de l'Afrique de l'Est, et une légère diminution sur les plaines d'Afrique de l'Ouest. Avec Epiclim, nous étudions, pour la première fois, l'impact de scénarios de rupture.

Comment travaillez-vous ensemble ?

G.R. : Les équipes du LSCE et de l'IPSL¹ fournissent les simulations

numériques du climat, sur la base notamment de scénarios originaux. Nos résultats nous indiquent comment les régions vont être touchées en terme de température, de précipitations, de saisonnalité, d'aridité des sols, etc., par la fonte des glaces nordiques. Cyril injecte ensuite ces paramètres dans ses modèles de paludisme et calcule une réponse en terme de dispersion des vecteurs pathogènes.

C.C. : Pour le paludisme, nous disposons de plusieurs modèles, qui vont des plus simples aux plus complexes. Les méthodes statistiques permettent de cartographier le risque en prenant en compte un ensemble de facteurs qui ne sont pas que climatiques (accès à l'eau, robustesse des systèmes de santé, etc.). Les méthodes mécanistiques, de complexité variable, sont quant à elles basées sur des paramètres climatiques (précipitations, température, etc.). Elles peuvent aussi intégrer des données comme la vitesse de réplication du moustique, le taux d'immunité de la population ou tenir compte du cycle de vie de l'insecte (larve - état adulte - œuf) et de ses différents états (non infecté, exposé, infectieux). Une approche multimodèle nous permet d'éprouver la robustesse de nos résultats et de mieux quantifier les incertitudes.

DRF IMPULSION

Depuis 2016, la recherche fondamentale du CEA réunit, au sein d'une même direction (DRF), 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.

Quelle est la tendance pour les années à venir ?

C.C. : Les premiers résultats sont attendus en fin d'année 2018. Mais on commence déjà à voir l'impact du climat sur ce type de maladies, qui pourrait se renforcer dans le futur.

G.R. : On peut aussi se demander si une nouvelle distribution des précipitations et des températures ne favoriserait pas l'émergence de nouvelles maladies. Nous discutons actuellement de ces sujets avec l'Institut Pasteur.

C.C. : Certaines maladies peuvent aussi ré-émerger, notamment à cause de la globalisation des échanges et de la résistance grandissante aux insecticides et aux médicaments... ♦

Notions clés

Paléoclimatologie

Science qui étudie les climats passés et leurs variations.

Calotte glaciaire

Grande étendue de glace continentale.

Giec

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



Le changement climatique pourrait déplacer les zones de paludisme en Afrique.

PLATEFORME TECHNOLOGIQUE

LE CEA-LETI ÉTEND SA LIGNE 300 MM

Le « 300 mm » (taille des plaques de silicium) est devenu le standard de toutes les technologies sur silicium. Dans ce contexte, le CEA-Leti a procédé à l'extension de la ligne 300 mm de ses salles blanches, afin de mieux répondre aux besoins de R&D de ses partenaires industriels. Cette nouvelle ligne permettra d'intégrer et de rendre compatible des technologies émergentes (notamment sa technologie de transistor FD-SOI ou la microélectronique 3D) avec les cadences et feuilles de route des industriels, principalement dans les domaines de l'intelligence artificielle, du calcul haute performance, de la photonique ou du stockage de données. Les applications concerneront autant les capteurs, imageurs, que la photonique sur silicium, les composants de puissance, les architectures et composants électroniques. AG

INFRASTRUCTURE

GRENOBLE BOOSTE L'INNOVATION OUVERTE

Un lieu entièrement tourné vers l'innovation technologique collaborative, à l'image des grands campus de rang mondial : voici l'ambition de l'*open innovation center* du CEA. Sa première pierre vient d'être posée sur le campus Giant¹ de Grenoble, en présence de financeurs du projet : la région Auvergne Rhône-Alpes et le département de l'Isère. Sur 3300 m², il rassemblera fin 2019 des industriels, chercheurs, étudiants, designers, artistes, investisseurs et aménageurs. Composé de plateaux projets reconfigurables, d'un atelier de prototypage rapide et d'un *showroom* des innovations, il a été conçu pour doper les collaborations, rapprocher les technologies du CEA des besoins des industriels, et développer des technologies émergentes. Les équipes projets multidisciplinaires seront accueillies pour une durée moyenne de 18 mois à 2 ans. Objectif : mettre en place un processus d'innovation tenant compte des mutations d'un secteur, des modèles d'affaires et des utilisateurs visés. SR

Note :

1. Alliance de 8 partenaires institutionnels (enseignement supérieur, recherche et industrie) de la ville de Grenoble, dont le CEA.

Salon international

Le CEA débarque au CES de Las Vegas

Fort de précédentes participations fructueuses, le CEA présente les *start-up* et l'offre technologique de ses instituts Leti, List et Liten au *Consumer Electronic Show* (CES), du 8 au 11 janvier 2019. Ce rendez-vous mondial de l'innovation est une opportunité unique pour rencontrer de futurs partenaires et dénicher les tendances à venir, notamment dans les domaines phares du CEA : énergie, santé, numérique. Le point avec le responsable de l'opération « CEA au CES », Jean-Michel Goiran.

Propos recueillis par Aude Ganier



françaises, et nous conservons la propriété intellectuelle sur nos développements pour en faire bénéficier nos partenaires nationaux.

D'où votre participation au prochain Consumer Electronic Show (CES) de Las Vegas, à travers plusieurs start-up...

Le CES est l'unique occasion, au monde, de découvrir les technologies numériques mondiales de pointe. La topologie de ses visiteurs est très intéressante car il attire, au-delà du grand public, la crème des investisseurs, diffuseurs et industriels. Il constitue par ailleurs une immense vitrine médiatique, dont nous avons su profiter.

Nos objectifs sont différents des grandes marques qui travaillent sur leur notoriété. Nous, nous présentons des technologies, à travers des démonstrateurs (que nous dévoilons sur notre stand) et nos *start-up*. Le CEA poursuit depuis toujours une politique volontariste auprès de ses chercheurs, fortement encouragés et soutenus dans la valorisation de leurs technologies. Et cela bénéficie à beaucoup : la France n'aurait pas eu de filière microélectronique sans Efcis (créée en 1972) ou de débouchés dans l'infrarouge sans

L'une des missions du CEA est de soutenir l'industrie française, quel est l'intérêt d'être présent à l'international ?

Notre mission est de défendre la compétitivité des industriels français en leur transférant nos technologies. Or, comment le faire si nous ne travaillons pas avec les cahiers des charges des leaders mondiaux ? Au début des années 2010, le CEA a déployé des antennes aux États-Unis et au Japon pour se présenter et se rapprocher de partenaires, initialement du domaine de la microélectronique comme Intel, IBM, Panasonic. Depuis, nous avons une vision précise de différents secteurs stratégiques et renforçons nos collaborations avec des acteurs incontournables. Ces industriels ne sont pas des concurrents directs des entreprises



Sofradir (1986). De même, nous ne serions pas *leader* sur la technologie des MEMS sans Tronics (1997) ou sur les dispositifs médicaux sans par exemple Diabeloop (2015), présente une nouvelle fois au CES avec un deuxième produit. Les industriels ne peuvent, seuls, absorber toutes les technologies qui voient le jour. C'est aussi en cela que nous remplissons notre mission de soutien à l'industrie française.



CES, édition 2018.

Que retenir de l'édition 2018 du CES ?

L'an passé, la France était la deuxième délégation, après les États-Unis, grâce au travail remarquable de l'association Business France pour accompagner les industriels et les régions. Ce rendez-vous est donc incontournable tant il offre un lieu privilégié d'échanges, formels et informels, y compris à des niveaux de hiérarchie que nous ne pourrions jamais atteindre en restant en France ! Précisément, lors des trois jours de l'édition 2018, nous avons établi 380 « contacts qualifiés » sur 600 visiteurs intéressés, qui ont généré 50 actions de suivi puis 11 propositions commerciales d'un montant total d'environ 2 millions d'euros.

Cette année encore, nous avons beaucoup à montrer avec les 8 démonstrateurs et *start-up* des instituts Leti, List et Liten. Avec de belles rencontres à la clé.

LE CES EN 2018

190 000

VISITEURS

4 000

EXPOSANTS DE 150 PAYS

5 000

JOURNALISTES-ANALYSTES

1 million

DE TWEETS

8 DÉMONSTRATEURS ET *START-UP*

ÉNERGIE

- **Multi Energy station** : Solutions robustes et sécurisées de modélisation du fonctionnement et de l'interaction entre différentes briques technologiques (hydrogène, solaire, batterie, réseau de chaleur, etc.) pour dimensionner et piloter des systèmes énergétiques.
- **Power Up** : Solution de gestion et de maintenance prédictive des batteries Li-ion pour préserver leur autonomie, grâce à un algorithme d'optimisation de charge et à la supervision temps réel de l'état des batteries des différentes flottes d'objets (véhicules, objets nomades...)

MOBILITÉ

- **Face** : Plateforme de calcul haute performance et flexible pour simplifier l'intégration de nouvelles fonctionnalités dans les véhicules (connectés et autonomes) et raccourcir les temps de mise sur le marché associés.
- **Sigma Cells** : Solution batterie 3-en-1 (onduleur, chargeur, système de gestion de batterie) revisitant les architectures « traditionnelles » et capitalisant sur les avantages d'une source d'alimentation multicellules, pour des batteries plus compactes et légères, et des recharges plus rapides.

SANTÉ

- **Diabeloop** : Dispositif médical personnalisé de gestion automatisée du diabète de type 1. (voir p.6).

AGROALIMENTAIRE

- **Connecting Food** : Solution digitale basée sur la *blockchain* qui trace les filières de production agroalimentaires et audite en temps réel que chaque produit respecte son cahier des charges (origine, labels bio, sans OGM...)

DISPOSITIFS INTELLIGENTS

- **Pixcurve** : Technologie de courbure des composants optiques permettant de réduire le nombre de lentilles et de rendre les dispositifs (appareils photos, smartphones, micro-écrans ou lunettes de réalité virtuelle) plus légers et compacts sans altérer leur qualité d'image.
- **Lotus** : Technologie haptique et surface tactile pour enrichir l'expérience utilisateur des interfaces homme-machine, grâce à un rendu hyper localisé.

WWW
www.cea.fr/Pages/actualites/CES-2019.aspx



Transfert industriel

Étape majeure pour la commercialisation du pancréas artificiel de Diabeloop

Soutenue par l'institut Leti du CEA dans un laboratoire commun, la start-up Diabeloop franchit une nouvelle étape vers la commercialisation de son dispositif de pancréas artificiel DBLG1™ : l'obtention du marquage CE¹.

Innovation de rupture dans l'automatisation du traitement du diabète de type 1, DBLG1™ comprend un capteur sous-cutané de mesure continue du taux de glucose et une pompe délivrant l'insuline. Ces deux éléments communiquent en Bluetooth avec un terminal hébergeant l'intelligence artificielle, dont les algorithmes commandent la pompe pour qu'elle délivre les doses optimales d'insuline.

Une avancée majeure pour les patients, leurs proches et les professionnels de santé dans la prise en charge de cette pathologie auto-immune qui touche plus de 200 000 familles en France et plusieurs millions d'enfants dans le monde. AG

Notes :

1. Energy-oriented Centre of Excellence - Simulation et calcul haute performance pour les énergies renouvelables.

2. Initiative conjointe du CEA, du CNRS, d'Inria, de l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et de l'université Paris-Sud.

Salon international

Le CEA s'expose à Supercomputing

La 30^e édition de Supercomputing, rendez-vous annuel mondial du calcul intensif, s'est tenue mi-novembre à Dallas. À cette occasion, le CEA a présenté ses projets de R&D autour des supercalculateurs et des futures technologies pour l'intelligence artificielle et l'informatique quantique ; tout comme il a mis en avant l'ensemble de ses moyens de calcul, ainsi que le nœud français du centre d'excellence européen EoCoE¹ qu'il coordonne via la Maison de la simulation².

Temps fort de ce salon : une visualisation multi-images, connectée en temps réel à la Maison de la simulation, en France, grâce à l'outil TiledViz permettant d'explorer simultanément des dizaines d'images 3D issues de simulations ou de collectes de données réelles pour le big data en neurobiologie et en astrochimie. SR

Note :

1. Marquage indiquant que le produit répond aux exigences des directives européennes qui lui sont applicables.



L'outil TiledViz sur le stand CEA du salon Supercomputing.



Stéphane Sibert, directeur de la recherche technologique du CEA, et Roget Genet, directeur général de l'Anses.

Partenariat

Au service de la sécurité sanitaire avec l'Anses

Développer des outils technologiques innovants au service d'une réactivité accrue en matière sanitaire dans les domaines de la santé animale, végétale, et de la sécurité des aliments. Tel est l'enjeu de la convention-cadre de partenariat signée par le CEA et l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, qui permettra de proposer aux pouvoirs publics des réponses rapides.

Une dizaine de projets collaboratifs ont été identifiés. Parmi eux, le développement de dispositifs de bio-collecte ou de capteurs pour détecter de façon précoce, au niveau des élevages et des cultures, des agents pathogènes. La mise en place d'une cellule d'intervention rapide pour l'identification de virus émergents chez l'animal, via des tests de détection et des vaccins, est également envisagée. AG



Formation nucléaire

Evoc : enseigner dans un réacteur en réalité virtuelle

Après le simulateur de vol, voici le simulateur de réacteur nucléaire ! Evoc est une plateforme multimodale d'enseignement en réalité virtuelle unique au monde développée par l'INSTN¹, la Direction de l'énergie nucléaire du CEA et le CEA-List. Elle intègre les codes de réactivité d'un réacteur nucléaire de recherche, couplés au simulateur multiphysique de réalité virtuelle du CEA-List. L'apprenant est plongé dans un hall où l'on combine des éléments tangibles (son, objets, effets haptiques) au virtuel (avec une représentation 3D de l'ensemble de la scène) pour une immersion totale qui lui permet d'intégrer les comportements adéquats dans un environnement nucléaire. Associé à d'autres enseignements numériques, Evoc permet d'aborder la physique des réacteurs, les notions et de sûreté et de sécurité nucléaire, sans les risques d'une installation nucléaire. SR

Note :
1. Institut national des sciences et techniques nucléaires.

Partenariat stratégique

Imec et le CEA, en bonne intelligence... artificielle !

Le centre de recherche belge Imec et l'institut Leti du CEA signent un mémorandum d'accord (MoU) en vue d'un partenariat sur deux chaînes de valeur stratégiques essentielles pour l'industrie européenne. Formalisé lors de la visite officielle en Belgique du président de la République Emmanuel Macron, cet accord porte sur les domaines de l'intelligence artificielle (I.A.) et de l'information quantique. Précisément, la collaboration se concentrera sur le développement, le test et l'expérimentation de l'informatique neuromorphique et quantique (deux technologies incontournables de l'I.A.). À la clé : le transfert de solutions de calcul pour le *hardware* et les fonctions numériques qui pourront être utilisées par les partenaires de l'industrie européenne pour innover dans une grande variété de secteurs : médecine personnalisée, mobilité, énergie, industrie manufacturière. Le CEA et l'Imec invitent dès lors l'industrie et le monde académique à les rejoindre pour bénéficier d'un accès à leur technologie de pointe. AG



Haute-instance

Le Haut-conseil pour le climat

Valérie Masson-Delmotte, climatologue du CEA et co-présidente du groupe 1 du Giec est nommée au Haut-conseil pour le climat. Installée par le président de la République le 27 novembre dernier, en lien avec la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), cette instance sera chargée d'apporter un éclairage, prospectif et rétrospectif, sur les politiques françaises de lutte contre le changement climatique. Indépendante, elle veillera à une meilleure intégration de la compétence scientifique et technique dans la prise de décision politique, ainsi qu'à la prise en charge au plus haut niveau de l'État de la problématique énergie-climat.

Ce Haut-conseil est composé de treize membres scientifiques, économistes, ingénieurs et experts : sa présidente Corinne Le Queré, Pascal Canfin, Michel Colombier, Marion Guillou, Céline Guivarch, Alain Grandjean, Jean-Marc Jancovici, Pierre Larrourou, Benoît Leguet, Valérie Masson-Delmotte, Katheline Schubert, Jean-François Soussana et Laurence Tubiana. AG



Signature du MoU par Emmanuel Sabonnadière, directeur du CEA-Leti, et Luc Van den Hove, PDG de l'Imec.

Insertion de l'échantillon de combustible irradié dans le diffractomètre de la ligne Mars de Soleil.



Énergie nucléaire

© Synchrotron Soleil

Soleil fait la lumière sur du combustible irradié

Le synchrotron Soleil fut le théâtre d'une première en novembre : la caractérisation par diffraction X d'un échantillon massif de combustible nucléaire irradié. Une expérience réalisée sur la ligne Mars, conçue spécifiquement pour les besoins du CEA en la matière. *par Aude Ganier*

Depuis 2006, le **synchrotron Soleil** étudie la matière pour en dévoiler la structure et les propriétés, autant de données précieuses pour la recherche et l'industrie. Toute la matière ? Y compris du combustible nucléaire irradié ? C'est la prouesse menée avec le CEA sur l'une des **lignes de lumière** de l'instrument, la ligne Mars.

Pour la première fois, les chercheurs ont réalisé la caractérisation microstructurale par diffraction X d'un échantillon massif (tronçon avec sa gaine) de combustible d'oxyde d'uranium irradié cinq ans dans le réacteur de Gravelines et refroidi pendant 23 ans. L'objet analysé, de quelques milligrammes et 50 microns d'épaisseur, représente une section radiale complète d'un crayon de combustible tel qu'il est exploité dans les réacteurs à eau pressurisée français. Jusqu'à présent, les équipements existants ne permettaient d'étudier que quelques grains de poudre.

La nécessaire adaptation d'une ligne de lumière pour recevoir des matériaux irradiants

Ce succès est le fruit d'une longue collaboration des équipes du synchrotron et de celles de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA à Saclay et Cadarache. Dès les années 2000, lors de la construction de Soleil, le CEA avait en effet émis le souhait de disposer d'une ligne de lumière « chaude ». S'en suivit un vaste défi technique, sous le contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire, pour adapter les instruments et les expériences d'analyses à des matériaux irradiants et contaminants.

Les résultats permettront d'obtenir des informations très fines sur l'organisation structurale et microstructurale locale du combustible, ainsi que sur l'évolution locale de cette organisation au sein d'une même pastille de combustible. De telles caractérisations contribueront à identifier les mécanismes physiques en jeu au sein du combustible afin de les prendre en compte dans la modélisation, et ainsi mieux prédire l'évolution de son comportement sous irradiation. ♦

Synchrotron

Accélérateur circulaire d'électrons (à une vitesse proche de la lumière dans le vide), courbant leur trajectoire pour qu'ils émettent un rayonnement de haute intensité, utilisé par les chercheurs pour déterminer la disposition des atomes dans la matière.

Soleil

Synchrotron situé à Saint-Aubin (Paris-Saclay), géré sous la forme d'une société civile détenue à 72 % et 28 % par le CNRS et le CEA.

Ligne de lumière

Laboratoire situé le long de l'accélérateur, composé de pièces successives dédiées à la préparation des échantillons, à leur analyse puis à l'enregistrement et au traitement des données recueillies.

WWW

synchrotron-soleil.fr/fr/videos/lumiere-sur-le-combustible-irradie

Mobilité

De l'Esprit dans l'autopartage

Les mini-voitures du projet Esprit sont électriques, en libre-service et... emboîtables ! L'idée, astucieuse, est portée depuis trois ans par un consortium de 16 partenaires. Elle s'est concrétisée cet été par trois démonstrations fonctionnelles dans trois villes européennes. *par Sylvie Rivière*

ESPRIT ET SES PARTENAIRES

Esprit (*Easily distributed personal rapid transit*) est financé par la Commission européenne dans le cadre du programme de recherche H2020. Il réunit 16 partenaires, dont le CEA-Liten, inventeur du concept et pilote du projet.

public, notamment en territoire péri-urbain, moins bien desservi que la ville », résume Valéry Cervantes. En pratique, je sors du transport public et je prends un véhicule pour compléter les derniers kilomètres de mon trajet. »

Un premier bilan positif

Après trois années de conception, Esprit vient de franchir l'étape du démonstrateur fonctionnel, avec un train opérationnel de 3 véhicules. Le concept a été présenté cet été à un panel d'usagers et de décideurs (collectivités locales, opérateurs de transport public, etc.). Un bilan positif à en croire les réactions des usagers. « 64 % d'entre eux estiment qu'ils auraient pu utiliser un tel système dans leur schéma de mobilité », assure Valéry Cervantes.

Comment transformer l'essai ?

Du côté des décideurs, la réaction est elle aussi enthousiaste. « Le projet intéresse plusieurs villes, non seulement en France, mais aussi en Allemagne, Pologne, Lituanie... les clients ne manquent pas. » Ils devront cependant attendre encore 2 à 3 ans, le temps de lever certains verrous : renforcement de la sécurité ; amélioration du confort ; et test de la fiabilité sur la durée. Valéry Cervantes l'annonce, « le prochain objectif est une expérimentation grandeur réelle pendant un 1 an ½ à 2 ans, avec une flotte de 30 à 50 véhicules répartis sur plusieurs stations, typiquement dans une zone d'emploi. » Dans l'immédiat, l'heure est à la recherche de financements pour mener le projet à terme : Europe, industriels... ♦

Près de 150 chanceux ont pu tester cet été « Esprit », le très innovant projet de véhicule en libre-service imaginé par le CEA (voir encadré). L'expérimentation se déroulait à Lyon, Glasgow et l'Hospitalet de Llobregat (près de Barcelone), trois villes partenaires du projet. Ces petites voiturettes électriques s'emboîtent les unes dans les autres, comme des chariots de supermarché. Cette fonction leur confère un avantage indéniable par rapport à tous les autres systèmes de véhicules en autopartage. Comme l'explique Valéry Cervantes, coordinateur du projet Esprit, « le train routier permet à un seul opérateur de redistribuer jusqu'à 8 véhicules à la fois d'une station à une autre, de sorte que toutes les stations soient toujours alimentées en voitures. » Autres intérêts de l'attelage : un gain de place en station ; et la recharge simultanée du train via le branchement électrique d'une seule voiture. « Esprit est conçu pour compléter l'offre de transport



Présentation et test d'un train de véhicules « Esprit » à L'Hospitalet de Llobregat (septembre 2018).

Le robot développé est capable d'enrouler 200 000 km de fibres de carbone autour de la vessie interne du réservoir en quelques dizaines de minutes.



Mobilité

Un réservoir d'hydrogène à toute épreuve

Une étape décisive pour les véhicules électriques à l'hydrogène est franchie : le CEA fait homologuer pour 2019, via son partenaire industriel, le premier réservoir d'hydrogène de 700 bars en Europe. Une avancée qui promet, à un coût modéré, une autonomie de plus de 600 km.

par François Ségué

« L'homologation¹ étant prévue pour 2019, le réservoir 62 litres à 700 bars pourra être fabriqué et commercialisé par notre partenaire français Raigi », annonce Stéphane Villalonga, responsable de la thématique « stockage de l'hydrogène gazeux » au centre Le Ripault du CEA. Fruit de quinze années de recherche au CEA, ce réservoir adapté au gabarit des voitures grand public permettra de charger jusqu'à 2,5 kg d'hydrogène (environ le double des réservoirs actuels de 350 bars). « En embarquant deux réservoirs, comme aujourd'hui pour la Toyota Mirai, il sera possible d'atteindre une autonomie de 600 km, comparable à celle des voitures à essence. Il s'agit d'un pas décisif ! », poursuit l'expert.

Jusqu'à 15 000 remplissages et vidanges sans fuir

À travers le processus d'homologation, toutes les précautions sont prises pour que l'hydrogène ne connaisse pas le triste sort² de la filière GPL (Gaz propane liquide). « Il faut que les risques soient très faibles, idéalement quasi-nuls, et que les gens acceptent l'idée de ce réservoir à haute pression », souligne Stéphane Villalonga. En se basant sur les règles de sécurité les plus drastiques, l'équipe Lavoisier³ a soumis chaque prototype à une batterie de tests extrêmes. « Par rapport aux performances nominales (700 bars de pression, 5 000 remplissages et

vidanges), nous avons démontré, par exemple, que ce réservoir pouvait être rempli et vidé 15 000 fois sans fuir, le tout dans des gammes de températures allant de -40 °C à 85 °C. » D'autres séries d'essais ont permis de tester différentes résistances : chutes, entailles, agressions aux produits chimiques, tirs à balle, incendies, surpressions... Ce dernier test impose par exemple un remplissage jusqu'à éclatement du réservoir pour quantifier ses limites : « La limite de résistance avant éclatement doit être supérieure à 1 575 bars, ce qui équivaut à plus de 1,5 tonne par centimètre carré. C'est comme si je portais une berline avec mon angle », calcule Bertrand Desprez, en charge du prototypage.

200 000 km de fibres de carbone enroulées en quelques dizaines de minutes

Comment résister à une telle pression ? « Objet banal, un réservoir est en réalité un vrai défi d'ingénierie : matériaux, thermo-mécanique, modélisation, calculs complexes, optimisation, chimie des polymères, procédés de fabrication et simulation des procédés, instrumentations, caractérisations... », relève Hervé Mathis, ingénieur du bureau d'études. Les chercheurs ont ainsi optimisé une coque en matériau composite à base de fibres de carbone, réputé pour sa résistance mécanique et sa légèreté. « Or, sa résistance mécanique n'est optimale que dans le sens de la fibre. Il a fallu développer un procédé d'enroulement filamentaire extrêmement précis pour ne laisser aucun point faible sur l'ensemble de la coque », précise Bertrand Desprez. Pour produire les prototypes, Christophe Manier et ses collègues ont adapté et mis au point un robot industriel à huit axes. Capable d'enrouler en quelques dizaines de minutes les 200 000 km de ces fibres ultralégères (dix fois plus fines que des cheveux) autour de la vessie de plastique intérieure du réservoir, il suit une architecture préalablement calculée puis programmée sur un logiciel de simulation du procédé dédié.

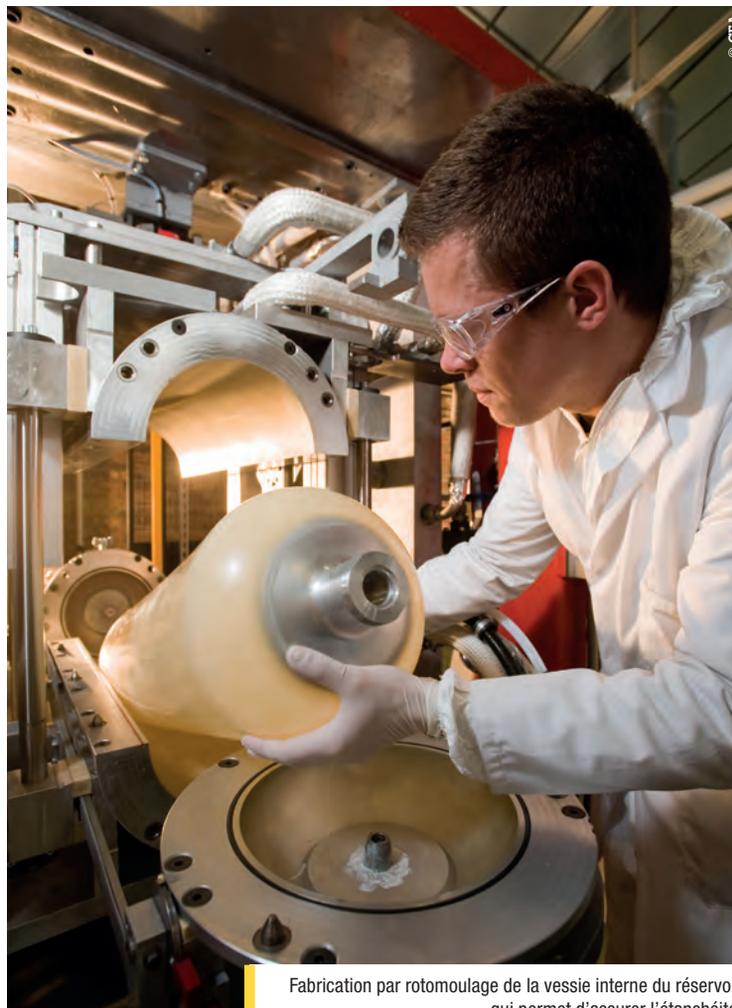
Une compétitivité en avance sur les feuilles de route européennes

Mais, sécurité et robustesse ne font pas tout. Encore fallait-il proposer un produit abordable, à l'heure où le prix des voitures à hydrogène demeure très élevé : « tous les procédés de fabrication utilisés sont courants dans l'industrie afin que nos partenaires puissent les mettre en œuvre à grande échelle. La vessie interne en polymère a été fabriquée sur une machine de rotomoulage bien connue des plasturgistes, tout comme le robot fait figure de standard dans l'industrie automobile », assure Stéphane Villalonga. Au terme du projet européen Copernic piloté par le CEA de 2013 à 2016, les équipes ont ainsi démontré la possibilité d'atteindre un coût de 600 euros/kg d'hydrogène stocké « en avance



Le premier réservoir d'hydrogène 62 litres, 700 bars d'Europe mis au point au CEA.

sur les feuilles de route européennes qui fixaient cet objectif pour 2020 », se félicite Stéphane Villalonga. Les chercheurs planchent déjà sur les prochaines générations de réservoirs. Enjeux : améliorer le rendement de la fibre de carbone et la robustesse du réservoir ; préparer la conformité à venir du produit ; et accroître l'acceptation de la technologie pour contribuer à l'émergence d'une mobilité hydrogène d'ampleur. ♦



Fabrication par rotomoulage de la vessie interne du réservoir qui permet d'assurer l'étanchéité.

Notes :

1. Homologation par un organisme certifié et accrédité par la Commission européenne.
2. Le décès d'un pompier lors d'une intervention sur un véhicule accidenté avait stoppé le développement de la filière.
3. Nom de la plateforme technologique du CEA au Ripault où travaille l'équipe.

5 GÉNÉRATIONS DE RÉSERVOIRS

Le réservoir de 700 bars est le fruit de quatre générations successives... et la recherche continue vers une cinquième génération.

Type 1 : entièrement métallique, lourd.

Type 2 : coque métallique avec un matériau composite déposé uniquement sur la partie centrale cylindrique pour alléger le réservoir.

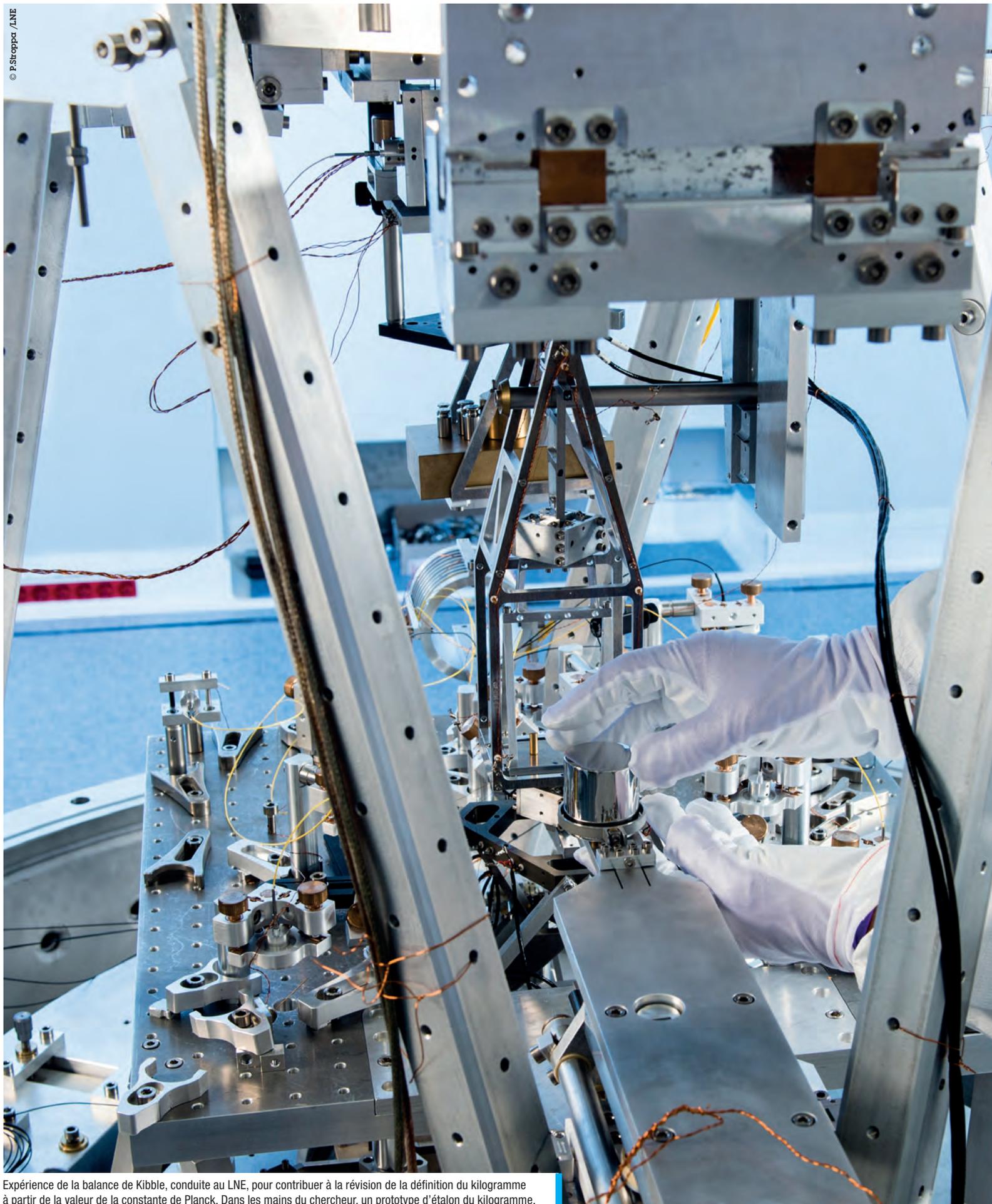
Type 3 : coque métallique avec un matériau composite déposé sur l'ensemble de la coque pour alléger encore plus le réservoir ; mais ce réservoir peut fuir avant les 15 000 remplissages et vidanges réglementaires.

Type 4 : réservoir de type 3 où la coque interne métallique est remplacée par une coque en polymère, et qui atteint les 15 000 remplissages et vidanges réglementaires sans fuir.

Type 5 : réservoir de type 4 où la coque interne polymère n'existe plus.

WWW

<http://project-copernic.com>



Expérience de la balance de Kibble, conduite au LNE, pour contribuer à la révision de la définition du kilogramme à partir de la valeur de la constante de Planck. Dans les mains du chercheur, un prototype d'étalon du kilogramme.

2 poids, 2 mesures !

P.14
Sept unités
constantes et
fondamentales

P.17
Maîtrise
et mesure
des rayonnements

16 novembre 2018 : le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole dévoilent leurs nouvelles définitions... quantiques ! Désormais, les sept unités primaires (avec le mètre, la seconde et la candela) du système international d'unités sont définies à partir de constantes fondamentales de la nature, immuables et universelles.

Un gage de précision qui impacte toutes les unités « dérivées », à l'instar de celles des rayonnements ionisants dont le CEA est un expert mondialement reconnu.

L'occasion d'opérer un retour dans l'histoire internationale de la métrologie, initiée à la Révolution française ; et de mettre en lumière la contribution du CEA, à travers sa plateforme de recherche en radiothérapie Doséo et le laboratoire national Henri Becquerel.

par Fabrice Demarthon

Sept unités constantes et fondamentales

En redéfinissant quatre unités primaires (kilogramme, ampère, kelvin, mole), la métrologie poursuit son évolution entamée il y a trois siècles. Une révolution pour cette « science de la mesure » dont les répercussions pourraient se faire sentir bien au-delà...

Le kilogramme est mort, vive le kilogramme ! Le 16 novembre 2018 à Paris, les représentants de 54 des 60 États membres du Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont voté une réforme historique du Système international d'unités (SI). Les nouvelles définitions de quatre des sept unités de base – le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole – ont été adoptées. Pour la première fois, et désormais, toutes les unités de mesure primaires dépendent de **constantes**

Note :
1. Métrologie, instrumentation et information.

fondamentales de la nature, et non plus d'artefacts matériels comme jusqu'à présent pour le kilogramme.

La précision des mesures au quotidien

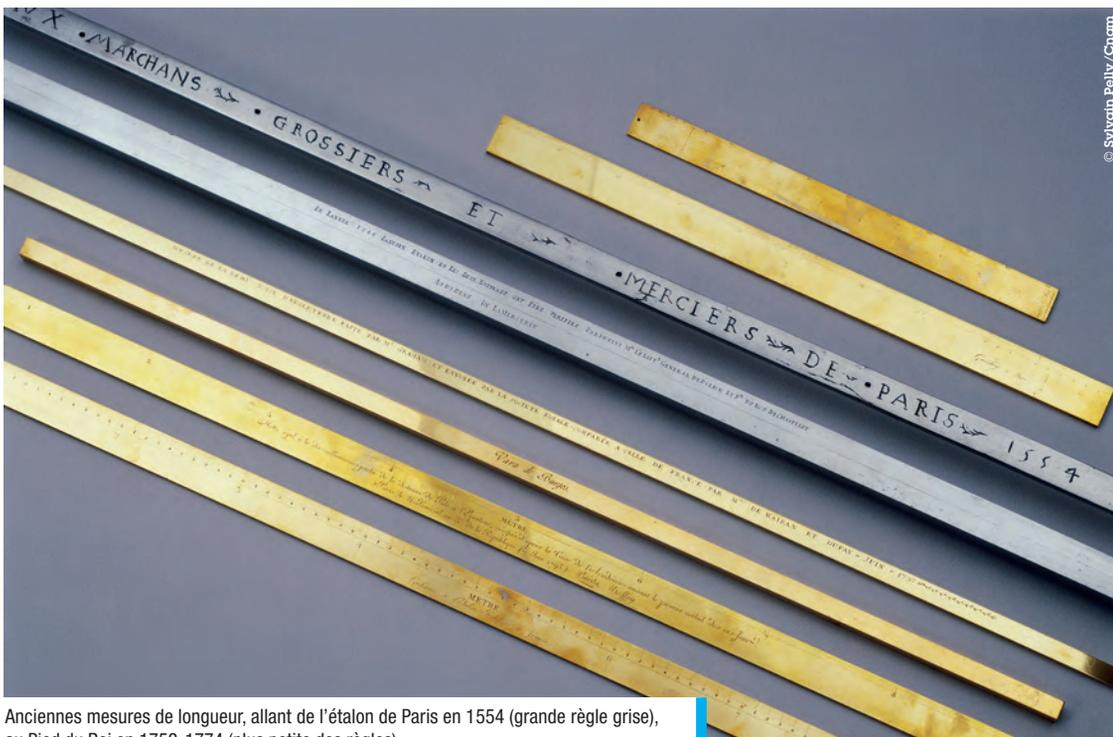
« Les évolutions des unités de mesure ont souvent apporté leurs lots d'avancées technologiques et industrielles », note Alexandre Bounouh, chef de département¹ au CEA-List. Le GPS en est l'exemple emblématique. Pour localiser un point sur la planète à quelques mètres près, il faut une mesure du temps extrêmement précise. Elle est basée sur des **horloges atomiques** dont la précision est de l'ordre de 10^{-16} s.s⁻¹ (16 chiffres après la virgule). C'est cette précision qui a permis, en 1967, la redéfinition de la seconde comme étant la durée de 9 192 631 770 « oscillations » d'un atome de césium 133. Sans cette évolution des unités du Système international (SI), et les technologies qui en ont découlé, notre civilisation communicante n'aurait peut-être pas le même visage.

Plus de 700 unités de mesure

Alors comment les unités de mesure sont-elles définies ? Par qui ? Et pourquoi faut-il parfois les modifier ? « Historiquement, tout a commencé avec le mètre, première unité de longueur qui définit le système métrique décimal », raconte Alexandre Bounouh. C'est en France, juste après la Révolution, qu'est fondé ce système métrique à partir des travaux de quelques scientifiques européens désireux d'établir une unité de longueur universelle. « C'était une nécessité, rappelle le chercheur. À l'époque, il existait plus de 700 unités de mesure, rien qu'en France. Or pour pouvoir commercer, il fallait parler un langage commun. » Les échanges devaient en effet reposer sur des grandeurs ne dépendant ni d'un lieu, ni d'un instant, ni même de la taille du pied du Roi comme ce fut le cas sous l'Ancien Régime !

Tout commence avec le mètre

La première définition officielle du mètre se fonde sur la circonférence de la Terre. En 1791, il équivaut au dix-millionième de la longueur du méridien entre le pôle Nord et l'équateur. Une règle en platine pur est alors forgée et conservée aux Archives nationales pour permettre des mesures de volumes (mètre cube), et ainsi accéder à celles des masses : en 1799, un étalon du kilogramme (le poids d'un litre – d'eau pure – à 4 °C) rejoint alors l'étalon du mètre aux Archives. Des copies permettent d'étendre ce nouveau système à d'autres pays mais les années passant, il devient de plus en plus évident que les étalons des Archives ne suffisent plus : la comparaison entre les copies est difficile, le mètre étalon, pas assez dur, peut se détériorer et le monopole de la France sur les grandeurs fait réagir les autres puissances.



Anciennes mesures de longueur, allant de l'étalon de Paris en 1554 (grande règle grise), au Pied du Roi en 1752-1774 (plus petite des règles).



L'ORGANISATION DE LA MÉTROLOGIE

Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) est l'organisation intergouvernementale garante du système mondial de mesures. Son rôle est, en autres, de « coordonner le système mondial de mesure, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures obtenus ». Pour cela, il s'appuie sur des organisations régionales comme Euramet, en Europe, et sur les laboratoires de métrologie nationaux. En France, le pilotage de la métrologie a été confié au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) qui délègue une partie des activités à d'autres organismes comme le Cnam, l'Observatoire de Paris ou le CEA. Ainsi, ce dernier abrite le Laboratoire national Henri Becquerel (LNHB), laboratoire national de métrologie pour les rayonnements ionisants (voir article p. 17).



Étalon du kilogramme en platine sous cloche.

Les 7 unités de base du SI

Il est donc décidé de réaliser de nouveaux prototypes, cette fois internationaux, du mètre et du kilogramme, et de mettre en place une autorité mondiale de la métrologie. En 1875, dix-sept pays signent la Convention du mètre qui instaure le Bureau international des poids et mesures (BIPM), au Pavillon de Breteuil à Sèvres (Ile-de-France). En 1889, sa première conférence générale adopte le mètre, le kilogramme, et la seconde ; et deux nouveaux étalons du mètre, en platine et iridium (alliage plus robuste) sont réalisés. Après l'ampère (intensité électrique) en 1946, c'est au tour du kelvin (température) et de la candela (intensité lumineuse) d'être reconnus officiellement en 1954 ; avant la proclamation, en 1960, du système international d'unités (SI), complété en 1971 par la mole (quantité de matière). « Ces sept grandeurs primaires permettent

Ces sept grandeurs primaires permettent de reconstituer toutes les unités de mesures existantes, dites "unités dérivées".

Alexandre Bounouh, chef de département au CEA-List.

de reconstituer toutes les unités de mesures existantes, dites "unités dérivées" », explique Alexandre Bounouh. (voir *Tout s'explique*)

L'enjeu de la précision des unités

Aujourd'hui encore, la métrologie mondiale est coordonnée par le BIPM qui réunit sa conférence générale tous les 4 ans ; l'occasion, pour les experts, de redéfinir les unités selon les progrès et les besoins de la science. L'enjeu est de taille : du spatial aux nanotechnologies, des télécoms à l'énergie, peu de

domaines technologiques ou industriels échappent à la nécessité de réaliser des mesures toujours plus précises et fiables sur le long terme, qui doivent de plus être reproductibles, c'est-à-dire « traçables ». Ainsi le mètre va-t-il radicalement changer en 1960 et en 1983 afin d'améliorer sa précision. D'une définition « géodésique », sujette à de nombreuses incertitudes, il est passé à une définition quantique, d'abord reliée aux émissions de lumière des atomes de krypton 86, puis à la vitesse de la lumière. La seconde, elle aussi, ♦♦♦

Constante fondamentale de la nature

Quantité physique dont la valeur numérique est fixe, c'est-à-dire invariable dans le temps et dans l'espace, et indépendante de tous les paramètres utilisés pour la mesurer.

Horloge atomique

Horloge qui utilise l'immuabilité de la fréquence du rayonnement électromagnétique émis par un électron, lors du passage d'un niveau d'énergie à un autre, pour assurer l'exactitude et la stabilité du signal oscillant qu'elle produit.



Préparation d'une expérience de la balance de Kibble pour étalonner une masse (dans les mains du chercheur) à partir de la valeur de la constante de Planck.

© P. Stéphan / LNE

Étalonner grâce à une constante physique

Pour ce faire, l'équipe composée de chercheurs du LNE, du Cnam et de l'Observatoire de Paris a utilisé un dispositif, baptisé balance de Kibble³, qui permet de comparer des puissances électrique et mécanique. Le LNE décrit son principe comme suit : « une balance dont l'un des bras supporte une masse et dont l'autre est relié à une bobine placée dans un champ magnétique. Par une mesure en deux temps, il est alors possible de relier cette masse, exprimée en kilogramme, à une tension aux bornes de la bobine et un courant y circulant. Le lien avec la constante de Planck se fait via des phénomènes quantiques impliquant cette tension et ce courant. »⁴ Exit donc le Grand K : la balance de Kibble permettra d'étalonner n'importe quelle masse en réalisant la mesure inverse de celle qui a permis d'évaluer la constante de Planck. Les étalons matériels ne sont toutefois pas totalement hors course : il en faut encore pour pouvoir disséminer le nouveau kilogramme sur la planète. Ils seront réalisés dans de nouveaux alliages comme l'Udimet 720.

La vie quotidienne ne sera pas perturbée

« Les équipes françaises ont aussi grandement contribué à l'évolution du kelvin, puisque leur mesure précise de la constante de Boltzmann, sur laquelle se fonde cette nouvelle définition, contribue à 55 % de la valeur moyenne retenue », ajoute l'expert. Avec ce nouveau kelvin, les températures pourront être établies au milliونيème près, du **zéro absolu** jusqu'aux très hautes températures. Une évolution cruciale, quand on sait que la température est mesurée dans la très grande majorité des processus industriels. Évidemment, le 20 mai 2019, date d'entrée en vigueur de ces nouvelles définitions d'unités, notre vie quotidienne ne sera pas bouleversée. « Un kilogramme pèsera toujours un kilogramme », lance Alexandre Bounouh. Mais qui sait ce que réservent ces nouvelles grandeurs totalement dématérialisées. ♦

a été profondément remaniée au fil du temps : d'abord « astronomique », car liée à la fraction des jours puis des années, elle est devenue « quantique » en 1967. Une nouvelle définition, basée sur des horloges optiques, encore plus précises que les horloges atomiques actuelles, est attendue pour 2025.

Une nouvelle définition du kilogramme

Le kilogramme, lui, n'avait pas changé depuis près de 150 ans. « Tous les quarante ans environ, son étalon conservé à Sèvres, baptisé le Grand K, était sorti de sa cloche protectrice pour être comparé à ses clones qui servent d'étalons nationaux aux quatre coins du monde, indique Alexandre Bounouh. Or, une

dispersion des masses des prototypes nationaux, et de leurs témoins, de l'ordre de 1×10^{-7} sur 100 ans avait été relevée. » La confiance était rompue...

Une affaire d'autant plus préoccupante que cette altération affecte les unités dérivées du kilogramme comme le joule et le watt. Durant 15 ans, les métrologues ont donc travaillé à une nouvelle définition du kilogramme en y intégrant une constante physique, la constante de Planck (h) afin de s'affranchir de l'étalon matériel. « Il a fallu obtenir une valeur de la constante de Planck extrêmement précise, indique le scientifique. La France était dans la course, produisant en 2017 une valeur de h avec une incertitude-type relative² de $5,7 \cdot 10^{-8}$. »

Zéro absolu

Température théorique la plus basse dont la valeur 0 est fixée à $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Notes :

2. Seuil de précision (10^{-8}) exigé par le BIPM pour redéfinir une unité.
3. Du nom de son inventeur, le physicien anglais Bryan Peter Kibble.
4. Source : www.lne.fr

Maîtrise et mesure des rayonnements

Si la redéfinition de quatre unités fondamentales n'affectera pas notre quotidien, il est une métrologie dont l'impact est déterminant : celle des rayonnements dits ionisants. Alpha, bêta, gamma ou X, ils sont issus de sources radioactives utilisées en médecine (imagerie médicale, radiothérapie) ou dans l'industrie nucléaire (exploitation, démantèlement, sûreté).



La métrologie des rayonnements ionisants est primordiale, et sa qualité est un enjeu très fort car la moindre erreur

peut avoir des conséquences sur la santé des patients et des travailleurs », explique Alexandre Bounouh, chef de

département¹ du CEA-List. C'est au Laboratoire national Henri Becquerel (LNHB) du List qu'a été confiée la tâche de maintenir les références nationales pour les mesures de doses et d'équivalents de dose, exprimées en gray et en sievert, ainsi que pour les mesures de radioactivité dont l'unité est le becquerel (voir encadré p. 18). En d'autres termes, les métrologues du LNHB développent des méthodes et des dispositifs d'une extrême précision afin de s'assurer que les sources de rayonnements utilisés en France possèdent la bonne activité ou délivrent la bonne dose et que les appareils capables de les mesurer (par exemple, les activimètres ou les dosimètres) fonctionnent correctement.

Pour la métrologie de la dose, le LNHB dispose de plusieurs faisceaux de rayonnement dits « primaires » : sources bêta (irradiateur BSS2) et gamma (cobalt 60 et césium 137) ; systèmes d'imagerie médicale (mammographies, radiographie) ; sources utilisées en **curiethérapie** (iridium 192, iode 125, cobalt 60) ; accélérateurs linéaires médicaux pour la radiothérapie, installé sur la plateforme Doséo (voir encadré p.19).

Maintenir et transférer les références de la dose radiothérapie

Le principe du maintien des références de la dose consiste d'abord à caractériser finement ces faisceaux. Les experts du LNHB ont donc développé des dosimètres extrêmement précis : calorimètres mesurant les variations de température de quelques millikelvin induites par les rayonnements dans une ampoule remplie d'eau pure ou un absorbeur en graphite ; chambres d'ionisation qui délivrent un signal électrique au passage des rayonnements ; dosimètres à l'alanine, un acide aminé qui produit des radicaux libres lorsqu'il est irradié. Faisceaux et dosimètres sont alors mis au service de ce que les métrologues appellent le transfert des références. « Une fois que toutes nos mesures ont été validées, nous pouvons "raccorder" nos clients », explique Isabelle Aubineau-Lanièce, physicienne du List. Nos dosimètres servent à étalonner directement les sources radioactives, les accélérateurs de particules ou les générateurs de rayons X qui seront utilisés dans les hôpitaux. Nos dosimètres primaires étant ♦♦♦

Curiothérapie

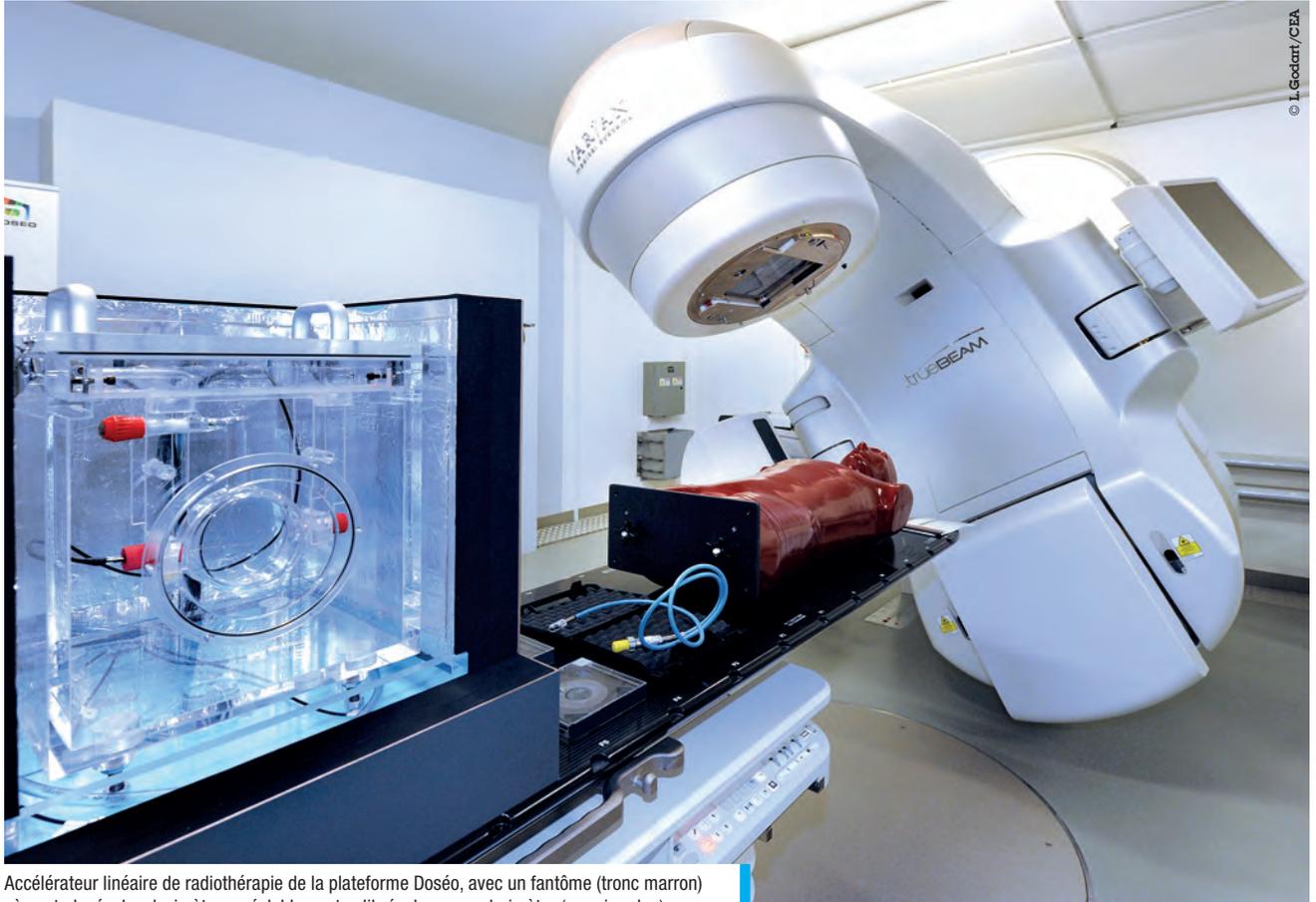
Traitement très utilisé notamment contre le cancer de la prostate, consistant à implanter des microsources radioactives à l'intérieur ou à proximité des zones cancéreuses.

Note :

1. Métrologie, Instrumentation et Information.



Dispositif de mesure cartographique 3D de la dose absorbée autour d'une source de curiethérapie (iridium 192) avec des détecteurs thermo-luminescents.



Accélérateur linéaire de radiothérapie de la plateforme Doséo, avec un fantôme (tronc marron) où sont placés des dosimètres préalablement calibrés dans un calorimètre (premier plan).

GRAY, SIEVERT ET BECQUEREL

La métrologie des rayonnements ionisants utilise trois unités « dérivées » : le gray (Gy) et le sievert (Sv) pour les mesures de dose, et le becquerel (Bq) pour celles de radioactivité. Cette dernière est la plus simple à comprendre : elle correspond à un nombre de désintégrations d'atomes par seconde et représente donc l'activité propre d'une source radioactive, indépendamment de son environnement.

Le gray et le sievert, eux, prennent en compte la matière qui reçoit les rayonnements. Le gray représente l'énergie absorbée par la matière équivalant à des joules par kilogramme. Il est utilisé pour exprimer les doses et caractériser les **effets déterministes** des rayons : premiers signes cliniques à partir de 0,5 Gy (cataracte), atteintes du système sanguin à partir de 2 Gy, etc.

Le sievert est utilisé pour exprimer les grandeurs de radioprotection permettant de gérer le risque d'apparition d'**effets stochastiques**, tels que les cancers, dû à une exposition aux rayonnements, via des estimations de dose équivalente et de dose efficace. Pour cela, la dose en gray est pondérée par des facteurs liés à la fois au type de rayons (w_R), qui n'ont pas tous des tissus affectés (w_T), qui ne réagissent pas de la même manière. Ces facteurs sont recommandés par des experts réunis sous l'égide de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). « Les w_T , par exemple, ont été déterminés au travers d'études épidémiologiques, principalement réalisées par un suivi dosimétrique et sanitaire des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, explique Isabelle Aubineau-Lanièce. Les scientifiques ont mis en évidence des excès de risques de développement de certains cancers selon les doses de rayonnements reçues à différentes distances de l'épicentre de l'explosion. » D'autres populations, comme les mineurs, les travailleurs de certains complexes militaires-industriels russes ou encore les enfants irradiés pour traiter la teigne au début du XX^e siècle, ont aussi été étudiées afin d'évaluer l'impact des radiations sur l'organisme.

difficilement transportables, nous étalonnons des dosimètres dits de transfert avec nos faisceaux de référence. Parfaitement étalonnés, ils permettront ensuite de calibrer les sources in situ. » Aujourd'hui, les mesures de doses effectuées au LNHB atteignent une incertitude allant de quelques dixièmes de pourcent à 2 %, permettant de satisfaire les exigences des hôpitaux, qui ont établi leur marge d'erreur à 5 % et dans certains cas à 3,5 %.

Étalonner sur place les sources radioactives de très courte durée

En matière de technologies de pointe, la métrologie de la radioactivité n'est pas en reste. Spectromètres alpha, bêta et gamma, bains de manganèse pour la mesure des débits d'émission neutronique, détecteurs cryogéniques maintenus à très basse température (20 K) capables de mesurer d'infimes élévations de température, compteurs de désintégrations dits « triples » pour

les gaz radioactifs... Cette panoplie permet de mesurer l'activité d'une très grande variété de sources radioactives solides, liquides ou gazeuses, et d'assurer le transfert des références vers les laboratoires d'étalonnage accrédités ou les utilisateurs finaux : hôpitaux, industrie nucléaire et organismes de surveillance de l'environnement. Le laboratoire a même mis au point un instrument miniaturisé, à l'aide d'une imprimante 3D, afin d'étalonner sur leur site de fabrication les sources radioactives de très courte durée de vie, celles qui n'émettent des rayonnements que durant quelques minutes et qu'il est donc impossible de transporter jusqu'aux laboratoires d'étalonnage.

Caractériser et discriminer n'importe quel environnement nucléaire

Évidemment, cette expertise dans la métrologie de la radioactivité sert aussi les desseins d'autres équipes,

sollicitées par leurs partenaires. Comme l'explique Frédéric Carrel, ingénieur-chercheur au List : « la mise au point de l'instrumentation pour la recherche ou l'industrie nucléaire s'appuie nécessairement sur la métrologie. Nous devons caractériser de manière très fine nos capteurs et donc disposer d'étalons de référence. »

Ainsi, les équipes du laboratoire² ont mis au point la caméra gamma GamPix (commercialisée par Mirion Technologies sous le nom iPix), et plus récemment sa version ultracompacte NanoPix³, avec l'appui des métrologues du LNHB. Véritable bijou de technologie, cette caméra est capable de localiser et d'identifier rapidement les sources de rayonnement gamma dans l'environnement. « La caméra embarque 65 000 détecteurs qu'il a bien fallu étalonner, indique Frédéric Carrel. Les métrologues ont pu nous fournir des sources plus ou moins exotiques pour parer à toutes les situations que pourrait rencontrer la caméra. » De la même manière, le LNHB a réalisé des sources radioactives en solution afin d'étalonner le dispositif SafeWater. L'appareil, composé de fibres scintillantes sensibles à la radioactivité est installé directement dans les canalisations d'eau potable et repère en temps réel une éventuelle contamination radioactive. Enfin, « le

LA PLATEFORME DOSÉO

Depuis 2014, chercheurs, industriels et praticiens hospitaliers disposent, à Saclay, d'une plateforme unique en Europe dédiée aux technologies de la radiothérapie et de l'imagerie. Fondée par l'Institut national du cancer (Inca), le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et le CEA, cette structure met à disposition de ses partenaires le *nec plus ultra* des appareils de radiothérapie ou d'imagerie nucléaire. Objectif : former des équipes médicales, et développer des systèmes à travers des projets de R&D collaborative. Récemment, le CEA-List et le Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont signé un accord pour l'utilisation des équipements de Doséo dans le cadre de la métrologie des rayonnements ionisants. À l'avenir, un laboratoire de radiobiologie devrait rejoindre la plateforme pour mener des études sur la radiosensibilité et ainsi améliorer les traitements par radiothérapie.

bain de manganèse du LNHB, qui sert à étalonner des sources neutroniques avec une très faible incertitude – de 1 à 2 % – nous a permis de développer des postes de mesures répondant aux besoins du CEA et qui combinent trois techniques différentes de détection des neutrons : la spectrométrie gamma, le comptage direct et l'activation de dosimètres », décrit Frédéric Carrel.

Traquer toutes les sources d'incertitudes

« Le travail du métrologue est de traquer toutes les sources d'incertitudes et d'en évaluer l'impact sur ses mesures », renchérit Isabelle

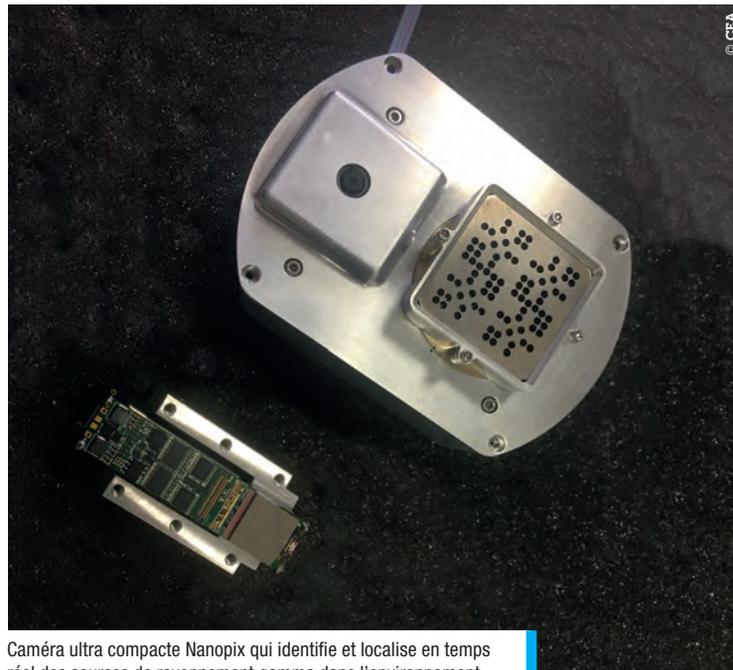
Nos dosimètres servent à étalonner directement les sources radioactives qui seront utilisées dans les hôpitaux.

Isabelle Aubineau-Lanièce, physicienne du List.

Aubineau-Lanièce. Heureusement, le scientifique n'est pas seul face à son instrument. Tous les laboratoires nationaux de métrologie participent à des campagnes de comparaisons internationales. Des étalons « voyageurs » circulent entre eux et des moyennes sont établies, limitant ainsi les risques d'erreur. ♦



Le dispositif SafeWater permet de repérer des traces de contamination radioactive dans l'eau.



Caméra ultra compacte Nanopix qui identifie et localise en temps réel des sources de rayonnement gamma dans l'environnement.

Effet déterministe

Effet qui apparaît de façon certaine quand le seuil limite de rayonnements est dépassé.

Effet stochastique

Effet qui n'est pas lié à un effet de seuil, et qui n'apparaît pas selon le principe d'une cause qui induit toujours le même effet.

Notes :

2. Laboratoire capteurs et architectures électroniques, rattaché au CEA-List.

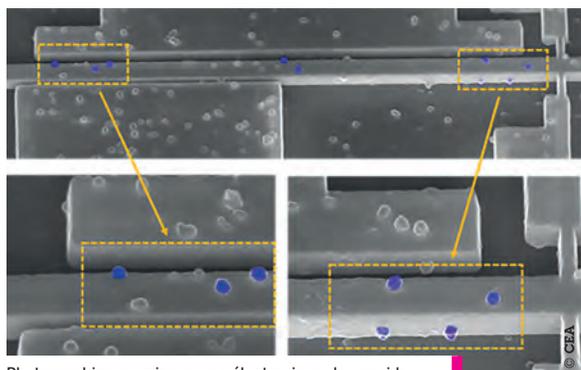
3. Voir *Les défis du CEA 228*.

- CEA - Leti**
Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information

- CEA - BIG**
Institut de biosciences et de biotechnologies de Grenoble

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

- NeuroSpin**
Centre de recherche en imagerie cérébrale



Photographies au microscope électronique de capsides de virus T5 sur un résonateur nanomécanique.

Instrumentation

Des nanobalances pour peser les virus

Une équipe de chercheurs français, dont ceux des instituts **Leti** et **BIG** du CEA, élabore une nouvelle technologie de spectrométrie de masse basée sur des résonateurs nanomécaniques, capables de mesurer la masse de particules jusqu'alors inaccessibles aux technologies commerciales. Ces dernières peuvent en effet peser un camion de plusieurs tonnes ou un atome d'hydrogène, mais rien de pertinent n'existait pour toute une gamme de masses intermédiaires, notamment dans le domaine des objets nanométriques : virus, biomarqueurs de pathologies comme les cancers ou les maladies dégénératives, nanoparticules synthétiques à visée biomédicale, etc. L'efficacité de cette nouvelle nanobalance a été démontrée en mesurant – une première – la masse de la **capside** d'un virus bactériophage. *SR*

Note :
1. Premier vol du modèle à échelle 1 Stratobus™.

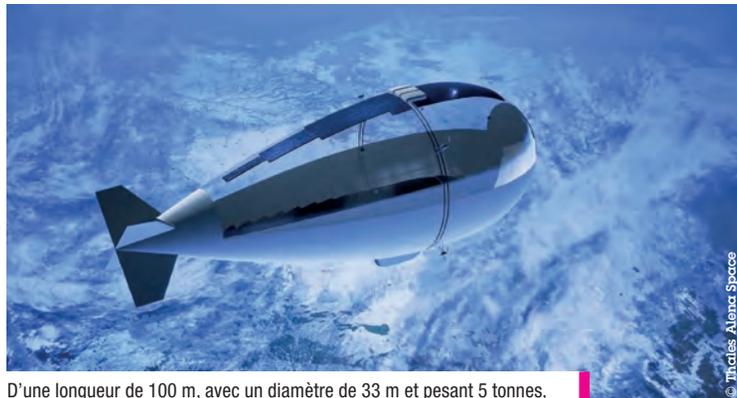
Capside

Coque protéique qui entoure le matériel génétique d'un virus.

Solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires de Stratobus™ tiennent la route

À partir de 2022¹, Stratobus™ évoluera pendant cinq ans, à 20 km d'altitude au-dessus du trafic aérien, pour des missions d'observations, de surveillance et de télécommunication. Pour cela, le dirigeable autonome stratosphérique de Thales Alenia Space sera équipé de modules photovoltaïques développés avec le **CEA-Liten**. Ces derniers, qui fourniront l'électricité nécessaire aux quatre moteurs électriques ainsi qu'au stockage de l'énergie et à la charge utile, réussissent les essais de validation mécanique statique. L'industriel confirme en effet la haute stabilité des matériaux d'encapsulation sous ultraviolet et ozone, et de faibles pertes de puissance relatives après les cycles thermiques. Ces modules sont hors norme : surface supérieure à 4 m², flexibles, ultralégers (< 800 g/m²), d'une puissance supérieure à 200 W/m², 24 % de rendement. Classiquement, les panneaux photovoltaïques ont une surface de 1,6 m² et pèsent environ 12 kg/m², le verre et le cadre aluminium du module représentant 80 % du poids total. « Pour répondre au cahier des charges, nous avons combiné plusieurs innovations : suppression du cadre remplacé par des fixations ; matériaux minces, légers et robustes pour réduire la masse ; composants électroniques assurant une protection électrique et thermique ; procédés de fabrication adaptés aux contraintes liées à la réduction d'épaisseur du module (< 0,5 mm au lieu de 4,5 mm) », indique Julien Gaume du CEA-Liten. *AG*

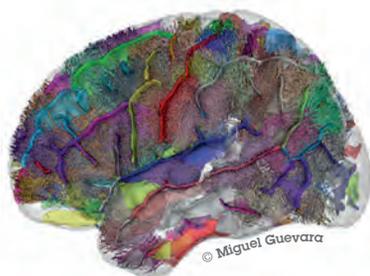


D'une longueur de 100 m, avec un diamètre de 33 m et pesant 5 tonnes, le stratobus™ évoluera à 20 km d'altitude.

Imagerie médicale

Autisme, un éclairage inédit grâce à l'IRM

Une nouvelle étude d'imagerie cérébrale, à laquelle participent des chercheurs de **NeuroSpin**, semble remettre en cause le modèle théorique dominant expliquant les troubles du spectre de l'autisme (TSA). Jusqu'à présent, les TSA étaient attribués à un déficit de connexions longue distance entre des neurones situés d'un bout à l'autre du cerveau, associé à une augmentation de la connectivité neuronale à courte distance entre des zones cérébrales adjacentes. Des images obtenues par IRM de diffusion ont d'abord permis d'établir le premier atlas des connexions courtes chez l'homme, puis d'étudier le lien potentiel entre les faisceaux de fibres qui le constituent et la cognition sociale chez une population adulte homogène de personnes présentant des TSA. Résultats : les sujets souffrant de TSA présentent une diminution de la connectivité dans 13 faisceaux « courte distance » ; une anomalie corrélée au déficit de deux dimensions de la cognition sociale, à savoir, les interactions sociales et l'empathie. Ces travaux, s'ils étaient confirmés à plus grande échelle, pourraient ouvrir la voie à l'exploration de nouvelles approches thérapeutiques. *SR*



Visualisation en 3D des faisceaux « courte distance » du cerveau.



Matériau magnétique.

Matériaux

Les convertisseurs montent en puissance

Passé maître dans l'art du moulage par injection de poudre (PIM), le **CEA-Liten** développe **un matériau magnétique doux** qui permet de réduire la masse, le volume et le coût des convertisseurs de puissance. Les essais sur un prototype d'une puissance de 60 W, couvrant les applications de chargeurs de tablettes et téléphones, ont généré des densités de puissance de 6 W/cm² contre 1 W/cm² avec les technologies classiques. Ces performances permettent de cibler différents marchés : automobile, électronique portable, *data centers*.

Produit à l'échelle de plusieurs kilogrammes, le matériau a été mis en forme par moulage PIM qui en conserve les propriétés intrinsèques, même lors de la réalisation de formes complexes issues de la conception 3D. AG

Matériau magnétique doux

Sous-groupe des matériaux ferromagnétiques (capables de s'aimanter lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique) dont l'aimantation nécessite moins d'énergie que les matériaux « durs ».

Paléoclimatologie

CO₂ : un rôle majeur dans l'englacement du Groenland

Les variations de teneur atmosphérique en CO₂ ont joué un rôle décisif dans l'englacement du Groenland à la fin du Tertiaire, il y a 3 - 2,5 millions d'années. Telle est la conclusion d'une collaboration franco-norvégienne conduite par le **LSCE**. L'étude, basée sur une technique innovante de couplage de modèles de climat et de **calotte** de glace, montre que la glaciation de l'hémisphère Nord n'a été possible que dans un contexte où le CO₂ atmosphérique avait diminué, entraînant un basculement vers un climat froid. Les teneurs associées sont au moins deux fois plus basses que celles correspondant à l'englacement antarctique, intervenu 30 millions d'années plus tôt¹ car géographiquement plus aisé. Le long déclin de la teneur en CO₂ atmosphérique² a duré 40 millions d'années, pérennisant l'installation de la calotte glaciaire du Groenland. Cette étude montre de nouveau toute l'importance de l'évolution du CO₂ dans les changements climatiques. SR

Calotte glaciaire

Grande étendue de glace continentale.

Notes :

1. Autour de 300 parties par millions en volume pour l'englacement du Groenland, contre environ 800 pour celui de l'Antarctique.

2. De 1 000 à 300 parties par millions en volume.

Dispositif expérimental

Reproduire la convection thermique stellaire



Une équipe du **CEA-Iramis** reproduit en laboratoire le régime de **convection thermique** observé à l'intérieur des étoiles. Grâce à un projet ERC¹, elle met au point un dispositif qui confirme pour la première fois des idées théoriques

proposées il y a plus de soixante ans.

La convection thermique est à l'origine des écoulements turbulents comme ceux de l'eau dans une casserole chauffée. À plus grande échelle, elle gouverne les courants marins, les orages, le magma des volcans, l'évolution des étoiles. Pour mieux comprendre ces processus, les chercheurs ont instrumenté une cuve contenant un mélange eau-colorant, chauffée par une puissante lampe (180 000 **lumens**). Un gradient thermique se forme alors dans le liquide à partir du bas, où la lumière est fortement absorbée ; des thermocouples mesurent l'efficacité du transfert thermique, en fonction du gradient. Résultat : une loi de puissance avec un exposant égal à 0,54 est observée, sensiblement le même que celui décrivant la convection stellaire turbulente. AG

Convection thermique

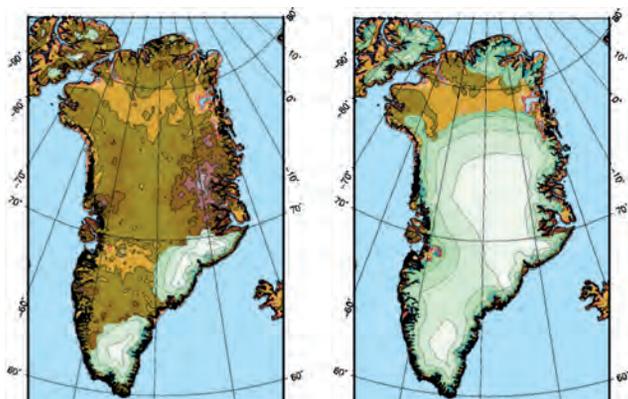
Transfert d'énergie thermique au sein d'un fluide en mouvement ou entre un fluide en mouvement et une paroi solide.

Lumen

Unité « dérivée » de mesure du flux lumineux (voir *Tout s'explique*).

Note :

1. Bourse européenne attribuée nominativement à un chercheur (Basile Gallet) pour soutenir la recherche exploratoire d'excellence de rang mondial.



Simulation de l'englacement du Groenland (en vert).
À gauche : - 2,9 millions d'années.
À droite : - 2,6 millions d'années.

© Ning Tan et al., 2018

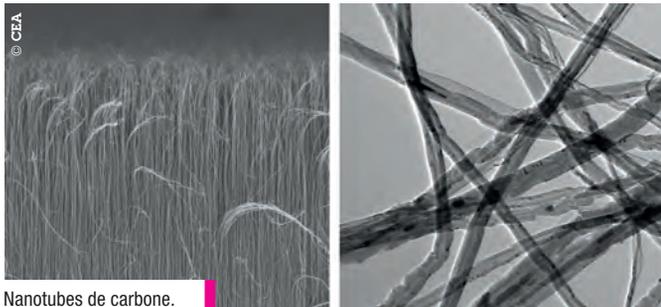
Nanotoxicologie

Mieux vaut une sphère qu'un tube

Quels sont les mécanismes biologiques à l'origine de la toxicité des nanoparticules, dont les études *in vitro* et *in vivo* montrent qu'elles peuvent générer un stress oxydant au niveau cellulaire suivi d'une inflammation ? Des chercheurs du **CEA-Iramis**, en collaboration avec l'Inserm, se sont penchés sur la question en exposant des cellules **macrophages** à diverses nanoparticules aux propriétés bien caractérisées. Résultat des observations par différentes techniques : toutes les nanoparticules sont incorporées par les macrophages ; en revanche, l'étape suivante de destruction ne se produit que pour les nanoparticules sphériques et non pour les nanotubes. En cause, comme le révèlent ces travaux, la perturbation de la synthèse d'une protéine qui empêche l'élimination des nanotubes par « autophagie ». AG

Macrophage

Cellule chargée de nettoyer l'organisme de particules étrangères potentiellement pathogènes.



Nanotubes de carbone.

Efficacité énergétique

Récupérer l'énergie du débit de l'eau

Les canalisations d'eau froide et de chauffage sont équipées de capteurs (pression, température, débit) alimentés par des piles ou des câbles. Pour les rendre autonomes en énergie et optimiser le fonctionnement des réseaux, le **CEA-Leti**¹ a conçu une microturbine hydraulique de quelques centimètres de diamètre qui récupère l'énergie du débit de l'eau circulant. Les tests menés en laboratoire, puis sur le réseau montpelliérain, ont validé la performance du système : la turbine génère assez de puissance électrique pour alimenter les capteurs (10 mW à 100 mW), s'arrêtant automatiquement quand le débit est trop faible et se remettant en route lorsqu'il redevient normal. AG

Note :
1. Dans le cadre du projet européen InDeal.



DEMAIN, QUELLE MÉDECINE ?

Impliqué depuis sa création dans la recherche en biologie et en santé, le CEA est devenu un acteur reconnu d'innovations technologiques et de leur intégration. Il dispose de plateformes exceptionnelles tant pour l'acquisition de données que pour leur interprétation ; il est également présent dans le domaine de la culture cellulaire 3D et de l'ingénierie biologique comme dans le développement de technologies numériques de pointe : algorithmes de fouille de données, modélisation, sécurité et cryptage des données...

Le CEA possède par ailleurs des moyens de stockage et de calcul très importants pour la simulation numérique, des compétences en développement d'architectures de logiciels spécifiques et de l'I.A. en santé. Autant d'atouts considérables qui le positionnent comme un acteur central en France dans le domaine de la médecine du futur. À découvrir dans le nouveau numéro de la revue *Clefs* du CEA.

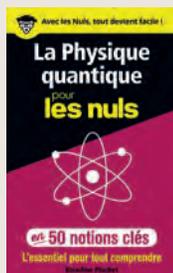
Master class
« Génomique et médecine du futur »
bit.ly/masterclass-medecine-futur



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.**

TOUT POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE QUANTIQUE



Mystérieuse, abstraite, contre-intuitive... telle est bien souvent la perception de la physique quantique pour les non-initiés. Pour y voir plus clair, l'auteur nous propose de découvrir, à travers 50 notions clés, toute la fascinante complexité de cette drôle de physique, ainsi que les nombreuses applications qu'elle a engendrées. Le tout « pour les nuls », c'est-à-dire dans un langage accessible à tous. Un vrai tour de force !

La physique quantique pour les nuls, Blandine Pluchet - First édition. 8,95 €

VOYAGE INTERPLANÉTAIRE



Dans une fiction riche en rebondissements, l'auteur met en images et en actions les découvertes et théories scientifiques de Stephen Hawking, agrémentées d'éléments biographiques de la vie du scientifique. Voyage dans l'espace-temps, traversée de trous noirs, exoplanètes, mécanique quantique... tous les pans de l'astrophysique sont ici abordés. Une belle manière d'attirer les plus jeunes vers cette discipline passionnante ; et de rendre hommage à ce grand scientifique parti en mars 2018.

Stephen Hawking, la fille d'Arkas et moi, Emmanuelle Kecir-Lepetit - Éditions Le Pommier. 13 €

LE TOUR DU MONDE EN SOLAR IMPULSE



43 000 km sans carburant, en 23 jours de vol, c'est possible ! L'ouvrage raconte le défi humain, technologique et écologique de l'avion Solar Impulse 2, parti faire un tour du monde en 17 étapes entre 2015 et 2016, à la seule force de l'énergie solaire. Ludique, il s'adresse à un jeune public, avec des photos, des cartes, des anecdotes et de nombreuses informations sur l'aventure et ses coulisses.

L'Avion qui vole avec le Soleil, Michèle Piccard - Éditions Larousse. 14,95 €



Édition

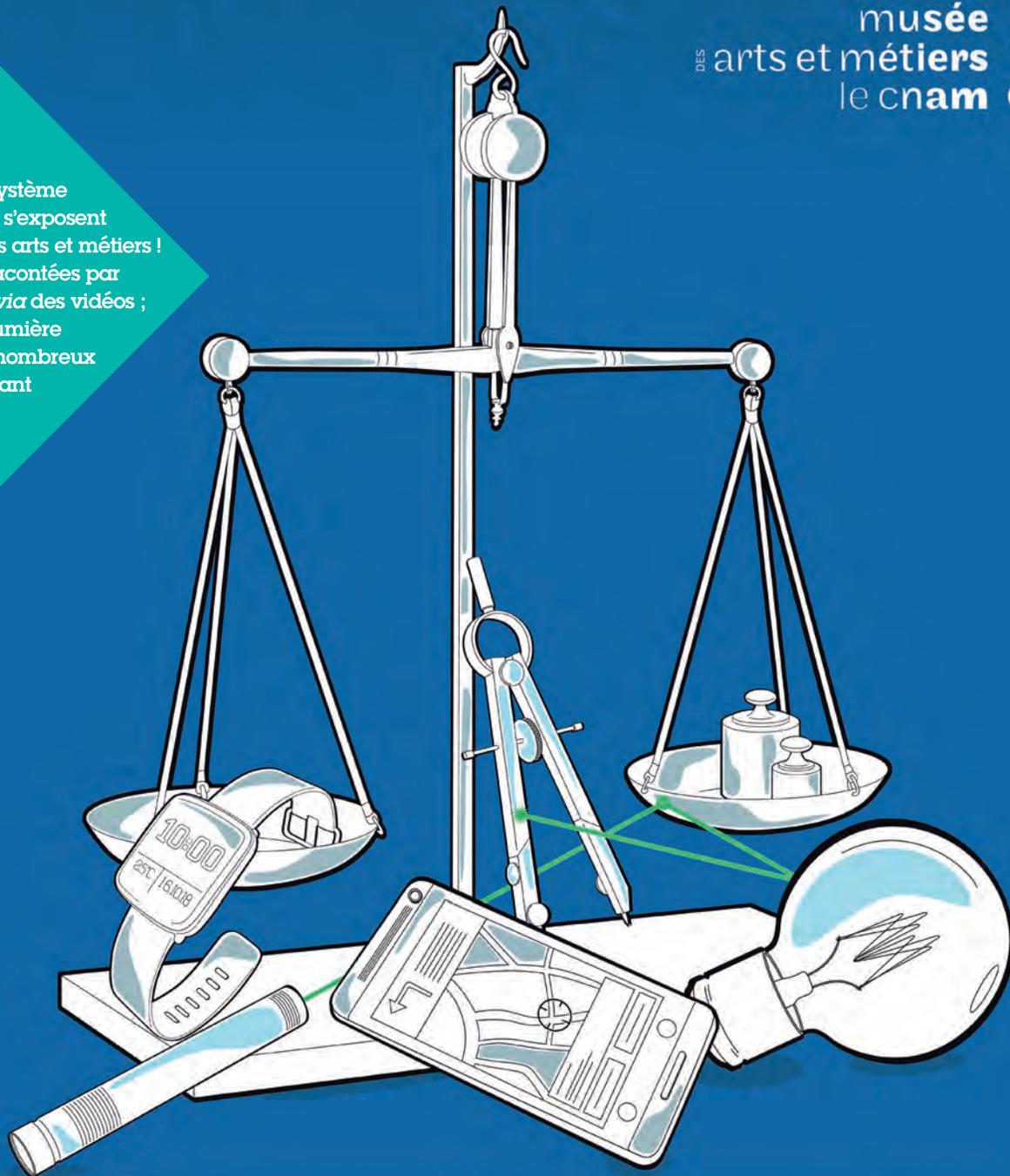
Le temps d'un livre

Le temps est-il une illusion ? Le temps a-t-il une fin ? Le temps est-il le même pour tous ? Pour tenter de répondre à ces questions, *Pour la Science* donne la parole, dans un numéro collector, à des auteurs de renommée internationale : physicien, philosophe, psychiatre, neurologue, sociologue... Ils nous donnent à voir les multiples facettes du temps et de sa perception. Ils nous rappellent par exemple que dans un trou noir, la notion géométrique conventionnelle d'espace-temps n'existe plus ; que notre corps fonctionne selon sa propre horloge biologique ; ou encore que notre cerveau anticipe la perception d'un objet d'environ 120 millisecondes...

Les paradoxes du temps, n° collector Pour la Science, novembre 2018-janvier 2019.

DES
musée
arts et métiers
le cnam

Les 7 unités
de base du Système
international s'exposent
au Musée des arts et métiers !
Elles y sont racontées par
des experts, *via* des vidéos ;
et mises en lumière
à travers de nombreux
objets incarnant
la mesure.



16 OCTOBRE 2018
5 MAI 2019
SUR | LES UNITÉS
MESURE | 7 DU MONDE

EXPOSITION

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS
60 RUE RÉAUMUR, PARIS 3^E
WWW.ARTS-ET-METIERS.NET

f [musee.des.arts.et.metiers](#)
@ [martselmetiers](#)
artsetmetiers
#ExpoSurMesure

Graphisme - JustinDeort.com

LABORATOIRE
NATIONAL
DE METROLOGIE
ET D'ESSAIS
LNE



SCIENCE&VIE

Le Parisien