

# les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

212  
Novembre 2016

TOUT  
S'EXPLIQUE

Supplément détachable  
sur **Spiral2**

02

## L'INTERVIEW

◆ L'accord de Paris sur le climat entre en vigueur, à la veille de la COP22 : le point avec deux experts ◆

05

## ACTUALITÉ

◆ Le changement climatique a son institut sur le campus Paris-Saclay  
◆ Factory Lab : usine à projets du futur  
◆ Faites de la science au CEA  
◆ Association autour de l'IoT et de la 5G ◆

07

## SUR LE VIF

◆ Signatures isotopiques repérées en HD dans des lignées cellulaires  
◆ Les rondes de l'oiseau solaire ◆

09

## LE POINT SUR

◆ L'analyse isotopique de matériaux nucléaires ◆

20

## SCIENCES EN BREF

◆ Gravity observe le cœur de la galaxie  
◆ Plus de 10 millions de contacts 3D au mm<sup>2</sup> !  
◆ Un convertisseur de puissance qui tient les 200°C  
◆ Nouveau microscope sans lentille  
◆ Les memristors sont de bons élèves !  
◆ Quand les petits tourbillons se dissipent  
◆ La jouvence naturelle des microtubules ◆

23

## KIOSQUE



12

DOSSIER

Transition numérique

## Le HPC dans le flux des big data

**VALÉRIE MASSON-DELMOTTE,**

paléoclimatologue du CEA au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) et co-présidente du groupe scientifique du GIEC

&

**JEAN-GUY DEVEZEAUX DE LAVERGNE,**

directeur de l'Institut d'études technico-économiques (I-tésé) du CEA



## Accord de Paris sur le climat: un grand succès, mais des modalités d'application qui restent à définir

Alors que l'Accord de Paris a été ratifié le 5 octobre dernier et qu'il entre en vigueur le 4 novembre, des incertitudes demeurent quant à l'atteinte de l'objectif de maintenir bien en deçà de 2° C la hausse des températures moyennes globales à l'horizon 2100. Ces incertitudes font écho aux difficultés économiques et sociétales de la mise en œuvre de l'Accord. Des points à l'ordre du jour de la COP22.

Propos recueillis par Aude Ganier

**Notes :**

1. *Conference Of the Parties* : Conférence des parties signataires de la convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques, rédigée en 1992 lors du 3<sup>e</sup> Sommet de la Terre de Rio de Janeiro.
2. Au 4 novembre 2016, 94 pays (représentant 66 % des émissions mondiales de GES) ont ratifié l'Accord de Paris.
3. *Intended Nationally Determined Contribution*, puis, après la COP 21, les NDCs (« *Intended* » n'étant plus de mise).
4. Les INDCs cumulées conduiraient à un réchauffement global d'environ 3°C à l'horizon 2100.

**L'Accord de Paris vient d'entrer en vigueur, moins d'un an après sa signature et à quelques jours de la COP 22 qui se tient à Marrakech du 6 au 8 novembre 2016. Quelles sont vos réactions ?**

**V.M-D :** L'Accord de Paris, signé le 12 décembre 2015 par les 197 délégations de la COP<sup>1</sup> 21, est le premier accord universel sur le climat. Pour entrer en vigueur, il doit être ratifié par 55 pays responsables

collectivement d'au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). Et ce seuil a été atteint le 5 octobre dernier<sup>2</sup>. C'est historique car il est le premier texte international à faire l'objet d'une adhésion aussi massive et aussi rapide. Depuis le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992, aucun consensus mondial n'avait émergé en matière climatique. Aujourd'hui, les pays se mettent d'accord pour maintenir la hausse de la température moyenne globale bien en deçà de 2 °C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle et de poursuivre les efforts pour limiter cette hausse à 1,5 °C. Et cela, avec l'objectif de réduire leurs émissions de GES de 50 % d'ici à 2050 et de 100 % en 2100.

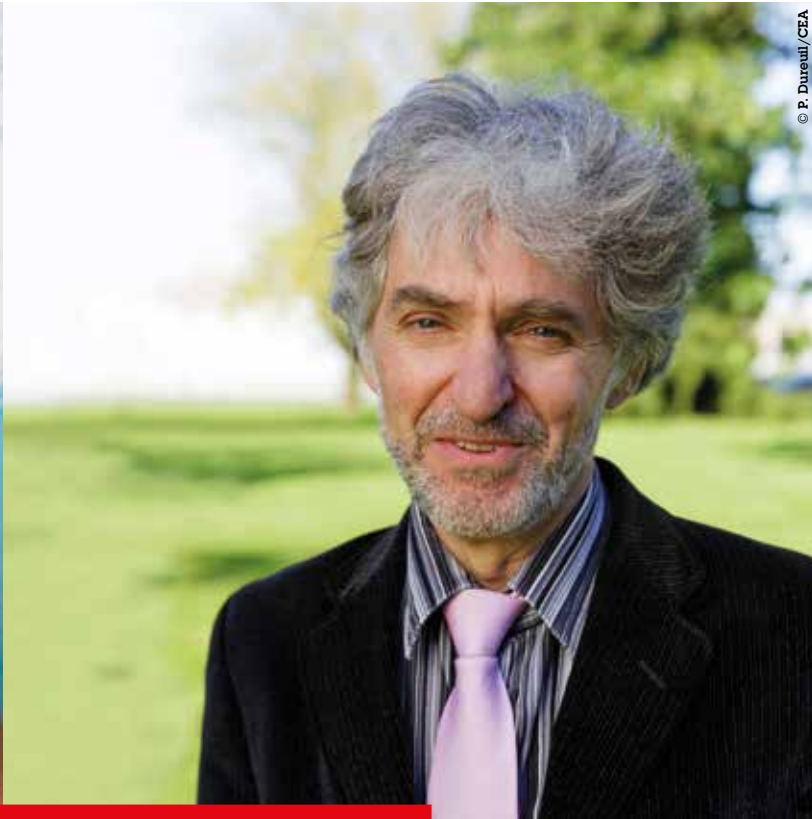
Dans cette perspective, 186 États ont élaboré leur contribution nationale (les INCDs et NDCs)<sup>3</sup>, sous la forme de trajectoires énergétiques et économiques prévisionnelles volontaires. Même si la somme des INDCs ne nous place pas, à l'horizon 2030, sur une trajectoire permettant à moindre coût de contenir le réchauffement bien en-deçà de 2° C<sup>4</sup> – une contradiction pointée lors des sessions techniques de

la COP 21 – ces engagements illustrent une dynamique et une volonté fortes de pays aux situations énergétiques, économiques et sociétales très différentes. C'est en cela un premier succès.

**J-G. D.d.L :** La ratification de l'Accord de Paris est en effet un acte politique historique ; et, au regard de la mobilisation d'une immense majorité de pays qui ont fourni leur INDC puis leur NDC, c'est un grand succès. Se posent à présent les questions relatives à la mise en œuvre très concrète des actions de transitions énergétique et climatique dans les pays. Cet accord est basé sur une logique non-contraignante d'engagement volontaire, ce qui n'est pas compatible avec une coordination centralisée des actions par l'ONU. Cette coordination va se faire « en marchant », selon des logiques décentralisées. Un gros point d'interrogation : la valeur du carbone ?

**Comment va s'organiser la mise en œuvre des actions de transitions énergétique et climatique ?**

**V.M-D :** L'entrée en vigueur de l'Accord de Paris était initialement



© P. Dureau/CEA

prévue le 1<sup>er</sup> janvier 2020, laissant notamment le temps de préciser les modalités de son application, dans un cadre non contraignant ; ce que feront la COP 22 et les suivantes. Cela concerne par exemple les mécanismes d'atténuation, c'est-à-dire de réduction des émissions de GES, et d'adaptation au changement climatique. Sur ce point, l'OCDE vient<sup>5</sup> de publier la feuille de route du Fonds « Finance climat » qui gèrera les 100 milliards \$ des pays développés en soutien à ceux en développement. Un groupe de travail a également été mis en place, piloté par Sarah Baashan (Arabie Saoudite) et Jo Tyndall (Nouvelle-Zélande), pour le suivi de l'entrée en vigueur de l'Accord. Celui-ci prévoit la réalisation d'inventaires, tous les cinq ans à partir de 2018, qui sont des points réguliers et actualisés de l'état du climat, du volume des émissions de GES et des trajectoires énergétiques prévues dans les NDCs. Élaborés dans une perspective la plus factuelle et objective possible, et reposant sur des connaissances scientifiques, ces inventaires serviront à aider les États pour revoir à la hausse leur contribution.

**J-G. D.d.L :** Il y a déjà de multiples actions mises en œuvre au niveau européen, particulièrement en France. La loi Transition énergétique pour la croissance verte (TECV), adoptée par le Parlement en juillet 2015, est le fruit de réflexions initiées il y a plus de 10 ans. Ces réflexions ont associé l'alliance Ancre<sup>6</sup> et le CEA, qui en est membre fondateur<sup>7</sup> et dont l'I-tésé a réalisé de nombreuses études technico-économiques dans le domaine de la transition énergétique. Mais des questions demeurent quant à l'application concrète de cette loi même si la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qu'elle a instaurée vient tout juste d'être promulguée<sup>8</sup>. Il s'agit d'une synthèse des objectifs et actions à mener sur une période de cinq ans qui doit, entre autres, aider à planifier les investissements à réaliser en France aux échelles nationale et territoriale. De manière générale, la transformation des NDCs en lois et politiques énergétiques nationales se pilote selon deux approches. Cela nécessite de trancher entre un cadre réglementaire qui représente un coût *grosso modo* nul pour l'État, et le volet économique qui repose sur

des dispositifs fiscaux incitatifs, des tarifs d'achats, des taxes carbone, etc. Pour résumer, soit on contraint aimablement, soit on oriente par des moyens financiers.

**V.M-D :** Ce type de problématique sera précisément abordé dans le rapport spécial du Giec que l'Accord de Paris a invité à préparer pour 2018, parallèlement au premier inventaire global. Avec les co-présidents de tous les groupes de travail du Giec, nous avons organisé la première réunion de cadrage rassemblant 600 experts de différents pays et différents domaines de compétence. Ce rapport évaluera les impacts d'un réchauffement global à 1,5°C et des trajectoires compatibles vis-à-vis des émissions de GES. Nous évaluerons les efforts supplémentaires à fournir et les options d'actions possibles selon l'objectif de long terme. Nous savons qu'il y a un potentiel de baisse des rejets de GES en fonction des options, notamment grâce aux travaux de l'I-tésé, mais nous allons nous interroger sur la capacité de transformation à tous les niveaux. Cela implique une recherche multidisciplinaire, associant également les sciences sociales.

### ***La transition énergétique ne se fera pas sans rupture technologique. Nous devons considérablement accélérer la R&D amont pour être au rendez-vous fixé par l'Accord de Paris***

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, directeur de l'Institut d'études technico-économiques (I-tésé) du CEA

**J-G. D.d.L :** À l'I-tésé, un de nos domaines d'expertise concerne le potentiel des technologies, les leviers d'actions pour les mettre en œuvre, ainsi que les « usages » car la dimension sociale est très importante. Notre récente étude *Decarbonization Wedges (DW)*, porte ainsi sur 108 technologies<sup>9</sup>. Elle montre que, dans les 10 années à venir, la mise en œuvre des trajectoires des NDCs est possible sur le plan technologique mais

**Notes :**

- 5. Le 17 octobre 2016.
- 6. Agence nationale de coordination de la recherche pour l'énergie.
- 7. Avec le CNRS, l'IFPEN et la conférence des présidents d'Universités CPU.
- 8. Décret n°2016-1442 du 27 octobre 2016.
- 9. Voir *Défis du CEA* n° 202.

qu'elle aura de nombreux verrous, principalement économiques. Il est en effet difficile de mobiliser des fonds, qui pourtant sont abondants au niveau mondial, dans le domaine de l'énergie car son économie est difficilement prévisible et comporte de nombreux risques peu assurables ou « mitigeables » à moyen et long terme. La réalisation du rapport spécial du Giec est donc très importante pour garder le cap et l'énergie insufflée par la COP 21. Il permettra d'interroger la dynamique en place car les perspectives demeurent inconnues. Une chose est sûre : l'avenir va se jouer dès le court terme, avant même 2030, car notre « crédit carbone » est de l'ordre d'une trentaine d'années de fonctionnement au régime actuel. Nous avons grand intérêt à accélérer le déploiement des transitions énergétiques.

### À côté des négociations géopolitiques des États lors des COP, comment est abordée la question de la R&D pour les énergies renouvelables ?

**J-G. D.d.L :** C'est justement l'un des points majeurs que nous soulevons aujourd'hui. Certes, la COP 21 a stimulé des initiatives en faveur de la R&D et de l'accompagnement des tissus industriels : mission Innovation lancée par les États-Unis et la Chine avec la France, Alliance solaire internationale initiée par l'Inde et la France, etc. Mais il faut réaffirmer lors de la COP 22 que la transition énergétique ne se fera pas sans rupture technologique. Nous devons, avec en ligne de mire l'horizon 2030, considérablement accélérer la R&D « amont » sinon nous ne serons jamais au rendez-vous de l'Accord de Paris. De même, il faut s'attacher à lever les verrous sociétaux, organisationnels et juridiques qui freinent la transition. Un atout est de la concevoir avec les parties prenantes et, comme le dit Valérie, il faut une approche pluridisciplinaire. En cela, nos deux structures de recherche collaborent entre elles et avec, par

### Quelques objectifs de la loi transition énergétique pour la croissance verte (TECV)

- 40% de réduction des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990
- 30% de réduction de la consommation d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012
- 50% de réduction de la consommation énergétique finale en 2050 par rapport à 2012
- 32% d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2030 (40% de la production d'électricité)
- 50% d'énergie nucléaire dans le mix énergétique à l'horizon 2025

### Quelques objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) à l'horizon 2023

- 12% de réduction de la consommation finale d'énergie
- 22% de réduction de la consommation d'énergies fossiles
- 70% d'augmentation de la capacité installée des énergies renouvelables électriques
- 35% d'augmentation de la production de chaleur renouvelable

## Je serai présente à plusieurs événements de la COP22, sur les besoins urgents de recherche fondamentale en sciences du climat, sur les femmes qui font progresser ces sciences, etc.

Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue du CEA au LSCE et co-présidente du GIEC

exemple, les alliances de recherche Ancre et Allenvi<sup>10</sup>. **V.M-D :** La R&D n'était pas spécifiquement abordée dans l'Accord de Paris qui ne vise pas la production de connaissances mais la production des conditions pour agir, en fonction des connaissances, notamment par le renforcement des capacités à travers la formation d'experts dans les pays du sud, indispensable pour éclairer les choix. Néanmoins, la R&D est évidemment au cœur des transformations nécessaires pour la réussite de cet Accord.

### Les experts du CEA seront-ils sollicités pour la COP 22 ?

**J-G. D.d.L :** En marge des négociations politiques, les acteurs publics et privés représentant les sociétés civiles organisent des événements. Dans ce cadre, l'agence marocaine MASEN<sup>11</sup>, avec laquelle collabore le CEA depuis 2015 sur des projets relatifs à l'énergie

solaire, organise une conférence sur le stockage de l'énergie et y convie Florence Lambert, directrice de l'institut Liten de CEA Tech et Nidhal Ouerfelli, directeur adjoint des relations internationales du CEA. La direction de l'énergie nucléaire est aussi impliquée localement. Et les experts du CEA répondront présent aux initiatives de l'Ademe et du ministère de la Recherche lors de la COP 22.

**V.M-D :** Au titre du Giec, je serai présente à plusieurs événements sur les besoins urgents de recherche fondamentale en sciences du climat, sur les femmes qui font progresser ces sciences. Je participerai également à une journée grand public à l'Université de Marrakech et à la COP 22, à une journée sur l'éducation au changement climatique à l'Académie des sciences marocaines, et enfin à une réunion de travail du Giec « Unfccc – collaborations & synergies » ♦

#### Notes :

**10.** Alliance nationale de recherche pour l'environnement.

**11.** Moroccan Agency for Sustainable ENergy.



Investissements d'avenir

## Le changement climatique $\alpha$ son institut sur le campus Paris-Saclay

Le projet « Changement climatique et usage des terres » (Cland) est sélectionné dans le cadre de l'appel à projets « Instituts Convergences » du programme d'investissements d'avenir lancé en février 2016. Coordonné par Philippe Ciaï, chercheur du LSCE, l'institut Cland évaluera des solutions liées à la gestion des terres et aux écosystèmes cultivés pour les transitions écologiques et énergétiques du XXI<sup>e</sup> siècle. Ses 200 chercheurs étudieront notamment le changement climatique, la production de nourriture, la dynamique de la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que les questions socio-économiques liées à l'usage des terres. Cland comporte également un programme universitaire impliquant l'université Paris-Saclay. Les instituts Convergences rassemblent des compétences de recherche scientifique de grande ampleur et de forte visibilité, notamment internationale, pour mieux répondre à des enjeux majeurs, à la croisée des défis sociétaux et économiques et des questionnements de la communauté scientifique.

Inauguration

## Factory Lab : usine à projets du futur



Plateforme d'innovation d'un genre nouveau, Factory Lab ambitionne d'être un creuset d'innovation pour l'usine du futur! Objectif : accroître la performance industrielle par l'intégration des technologies (matérielles et logicielles) à fort potentiel applicatif pour les sites de production.

Pilotée par des entreprises qui expriment des besoins et des problèmes concrets et mutualisables, Factory Lab est un lieu de rencontres entre des utilisateurs finaux et des fournisseurs de technologies, soit entre grands groupes et PME. Quatre thèmes sont ciblés : usine digitale flexible, automatisation des procédés de fabrication et de contrôle, assistance physique et assistance cognitive aux opérateurs. Située dans les locaux du List,

institut de CEA Tech, sur le campus Paris-Saclay, Factory Lab accueillera environ 20 projets par an pour un budget de 40 millions d'euros sur cinq ans. Les projets sont définis et validés tous les six mois par les partenaires du consortium : ouvert à d'autres acteurs de l'écosystème, celui-ci se compose aujourd'hui du Groupe PSA, de Safran, DCNS, Dassault Systèmes, et Actemium, ainsi que du CEA, du Cetim, et des Arts & Métiers.



L'usine du futur, en mode Lego™.



Le secrétaire d'État à l'Industrie et le directeur du List.



Expérience de réalité virtuelle.

Événement

## Faites de la science au CEA!

Comme tous les ans, le CEA a répondu présent pour la Fête de la science. Nombreux étaient ses chercheurs à venir à la rencontre des publics dans différents lieux de culture scientifique, à Saclay, Tours, Dijon, Bordeaux, etc.

Le CEA a également ouvert les portes de certains de ses centres, parmi lesquels : Cadarache et Marcoule (tous deux coordinateurs de toutes les actions dans leurs régions respectives), Fontenay-aux-Roses et l'Ines. Au programme : visite de laboratoires, manip', ateliers, conférences, rencontres avec des scientifiques du CEA... Un événement ouvert à tous, avec une opportunité pour les plus jeunes d'enrichir leurs connaissances et de découvrir peut-être de futures vocations.



À l'Ines.



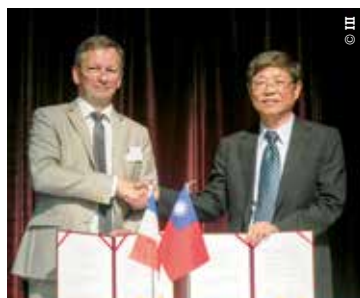
À Cadarache.



À Fontenay-aux-Roses, dans le Hall Zoé.



Au Visiatome de Marcoule.



Les représentants du Leti et de l'III.

Partenariat international

## Association autour de l'IoT et de la 5G

Très complémentaires tant dans leurs compétences que dans leurs écosystèmes, le Leti, institut de CEA Tech, et l'Institut des technologies de l'information (III) de Taiwan signent un accord. Objectif: mener en commun des études exploratoires sur les technologies pour l'information et la communication en relation avec l'Internet des objets et la connectivité sans fil haut débit au standard 5G. « Ensemble, nous allons mettre au point des solutions très innovantes pour l'Internet des objets connectés en haut débit dont nous démontrerons la pertinence pour les industriels et les consommateurs, en Europe comme à Taiwan », explique Marie-Noëlle Semeria, directrice du Leti.

## Procédés

# Signatures isotopiques repérées en HD dans des lignées cellulaires

Lors de l'incorporation d'un élément chimique, des cellules humaines en culture sélectionnent préférentiellement un de ses isotopes. Telle est la surprenante découverte<sup>1</sup>, de chercheurs travaillant dans le cadre du programme « Toxicologie » du CEA. Une piste inédite vers de futurs biomarqueurs ? *par Vahé Ter Minassian*

© C. Bresson/CEA

**Nous avons souhaité appliquer nos compétences dans le vivant.**

*Carole Bresson, du Lanie*



Introduction de l'échantillon de lignées neuronales, au sein même d'une boîte à gants, dans le spectromètre de masse Neptune.

**P**our déterminer avec haute précision les teneurs relatives des isotopes de quelques nanogrammes d'éléments dans des échantillons biologiques, des spécialistes de la DEN ont dû batailler ferme et développer toute une chaîne de procédures analytiques adaptées. « *Au Lanie<sup>2</sup>, nous maîtrisons les analyses isotopiques dans de nombreux échantillons, notamment de combustibles irradiés ; nous avons souhaité appliquer nos compétences dans le vivant* » introduit Carole Bresson du Lanie qui, avec le chercheur Euro Talents<sup>3</sup> Eduardo Paredes et des collègues du Biam et du CNRS<sup>4</sup>, a étudié l'effet de faibles concentrations d'uranium naturel dans une lignée neuronale humaine différenciée : « *nous avons pu exposer de telles cellules à ce contaminant pendant sept jours, ce qui est remarquable. Et nous avons pu mettre en évidence une incorporation préférentielle de l'uranium 235 (<sup>235</sup>U) par rapport à <sup>238</sup>U.* »

L'idée que des cellules puissent distinguer les isotopes d'un même élément chimique est tout à fait récente. À ce jour, une seule équipe dans le monde<sup>5</sup> a réussi à le démontrer pour le cuivre dans une lignée hépatique humaine ; et cela en mesurant des variations des rapports <sup>65</sup>Cu/<sup>63</sup>Cu de l'ordre de 0,1 %. L'étude d'Eduardo Paredes et de Carole Bresson va plus loin en révélant une variation d'à peine 0,03 % des rapports isotopiques de l'uranium naturel dans la lignée neuronale. Elle livre par ailleurs des informations pour mieux comprendre les phénomènes en jeu : par exemple, cette sélectivité opère lorsque les cellules sont exposées à des concentrations sub-toxiques d'uranium naturel.

L'enjeu est considérable tel que l'explique la spécialiste : « *ces variations dans l'organisme des signatures isotopiques de certains éléments, constatées dans le sang mais dont l'origine est pour l'instant inconnue, sont fortement suspectées par la communauté scientifique d'être liées à des stades précoces de maladies* ». De quoi préfigurer de futurs projets pour étudier de nouveau type de biomarqueurs ? ♦

## Notes :

1. Publiée dans PNAS.
2. Voir pages 9 à 11 de ce numéro.
3. Programme du CEA, co-financé par la Commission européenne, favorisant la mobilité internationale des chercheurs de haut niveau.
4. Institut d'imagerie chimique et spéciation – Université Bordeaux Gradignan.
5. École normale supérieure de Lyon/ CNRS / Université Lyon 1 Gradignan.

Énergie solaire

# Les rondes de l'oiseau solaire

Premier drone solaire commercialisable, SB4-Phoenix s'alimente grâce à des modules photovoltaïques développés au Liten. Une innovation *made in France*, dans le cadre d'un partenariat rondement mené en région par les équipes de CEA Tech avec Sunbirds.

par Hugo Leroux

Note :

1. Voir *Défis du CEA* n° 209

C'est un champion d'endurance : SB4-Phoenix, développé par la société toulousaine Sunbirds, est le seul drone léger capable de voler 8 heures d'affilée, là où ses concurrents tiennent maximum 3 heures avec une propulsion électrique. Un avantage lié à sa propulsion solaire et à sa structure ultra-légère que Sunbirds compte exploiter pour attaquer le marché mondial de la surveillance des grandes infrastructures, de l'environnement ou des exploitations agricoles, dès l'an prochain.

Derrière cet ambitieux drone solaire *made in France*, il y a un partenariat industriel né à Toulouse entre CEA Tech et Sunbirds. Début 2015, la start-up a optimisé le concept et la structure de son engin. Mais un élément

essentiel échappe à son savoir-faire : la production d'énergie solaire. Elle se tourne alors vers la plateforme toulousaine de CEA Tech, spécialisée dans le développement et le transfert de technologies issues du CEA, afin d'identifier la technologie la plus adaptée.

## Un défi technique et une solution industrialisable

En s'appuyant sur l'expertise du Liten, l'intégration de cellules photovoltaïques à haut rendement a pu être réalisée sur l'aile de Sunbirds. « *Le défi principal résidait dans le rapport puissance/masse. Il a fallu mettre au point une aile solaire robuste, extrêmement légère et industrialisable ; capable d'intégrer le maximum de cellules solaires tout en respectant l'aérodynamisme de l'aile* », explique Julien Gaume, chef de projet au Liten. Les équipes du CEA et de Sunbirds ont alors identifié un industriel capable d'accueillir une ligne de production pour début 2017.

Sunbirds envisage à l'avenir d'impliquer CEA Tech pour développer de nouvelles générations de drones. Ce partenariat fructueux illustre la démarche de proximité privilégiée par CEA Tech pour soutenir l'innovation industrielle en régions, notamment grâce à des plateformes dimensionnées pour être au plus près des porteurs de projets<sup>1</sup>. ♦





La conception et la gestion d'un cœur de réacteur nécessitent de prévoir et de contrôler le comportement du combustible, et donc de connaître précisément l'évolution de sa composition isotopique. L'analyse des proportions relatives des isotopes dans un échantillon fait appel à des technologies de pointe, pour lesquelles le laboratoire Lanie du CEA dispose d'un savoir-faire reconnu internationalement.

par Vahé Ter Minassian



## L'analyse isotopique de **matériaux nucléaires**

### Isotopique

Différentes formes d'un atome qui ont le même nombre de protons et d'électrons mais différent de par leur nombre de neutrons.

### Neutronique

Étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions qu'ils y induisent.

**A**rchéologie, climatologie, géosciences, santé, environnement, lutte contre la fraude ou la contrefaçon... Un large champ de disciplines a recours à l'analyse **isotopique**. Qu'il s'agisse de dater un phénomène ou de suivre son évolution dans l'espace ou le temps, de nombreuses équipes dans le monde travaillent à la détermination des éléments et isotopes présents dans des échantillons. Rares sont cependant celles qui, à l'instar du Lanie (Laboratoire de développement Analytique Nucléaire, Isotopique, Élémentaire) de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA, mettent en œuvre cette opération directement sur des matériaux nucléaires, et à de si hauts niveaux de précision. Une des missions de ce laboratoire installé à Saclay ? Révéler la composition en éléments et isotopes des combustibles usés des réacteurs nucléaires ! En effet, rappelle Thomas Vercouter son responsable : « *la conception et*

*la gestion d'un cœur de réacteur font appel à des "codes de calculs" conçus par les spécialistes de la neutronique. Ils leur servent à prévoir ou contrôler le comportement du combustible après qu'il ait été introduit dans cette partie de l'installation nucléaire ; c'est-à-dire à simuler la façon dont sa composition en termes d'isotopes va évoluer sous le flux de neutrons* ». Or, que ce soit pour répondre à des besoins de programmes de qualification avec des industriels ou dans le cadre de recherches, ces physiciens confrontent leurs modèles et données avec les analyses de matériaux après irradiation afin de les valider ou d'affiner les champs d'application. C'est là qu'intervient l'analyse isotopique et élémentaire des combustibles ayant véritablement séjourné en réacteur, avec une exigence de haute précision. Cet examen est confié au Lanie qui, outre l'équipement adéquat, dispose d'un savoir-faire mondialement reconnu depuis près de trente ans. ♦♦♦



### Au préalable, la séparation des éléments

Fruit d'une suite d'ajustements patiemment effectués au fil des ans, le travail de ce laboratoire s'appuie sur une longue chaîne d'étapes analytiques mises en œuvre depuis le moment où l'échantillon arrive du centre du CEA de Marcoule, dilué dans une solution acide et enfermé dans un « château » de plomb. Après avoir défini précisément les objectifs analytiques, l'examen débute par une séparation des éléments de l'échantillon, dans l'une des deux salles équipées de boîtes à gants du Hall Actineo du Lanie<sup>1</sup>. Hélène Isnard, experte en **spectrométrie de masse**, présente que cette étape dont le but est « d'extraire et d'isoler par des techniques de **chromatographie** liquide chaque élément d'intérêt de l'échantillon du combustible irradié : uranium, plutonium, actinides mineurs (comme le curium ou l'américium) et produits de fission (néodyme...) ». Pour cela, la solution est introduite dans des colonnes contenant des résines dites « échangeuses d'ions ». Ces substances ont la propriété de capter sélectivement (ou « fixer », dans le jargon des chimistes) une partie des composés, sans agir sur les autres ; ce qui fournit aux chercheurs un moyen de séparer les éléments chimiques, les uns des autres. Les éléments de propriétés chimiques proches sont

quant à eux séparés par des techniques de chromatographie liquide sous pression de haute performance.

### Les isotopes passés au crible des spectromètres de masse

Après plusieurs opérations de séparation permettant de collecter des solutions purifiées de chaque élément, la mesure isotopique peut commencer. Dans une troisième salle du Hall Actineo, l'analyse consiste à déterminer les proportions relatives des isotopes d'un échantillon grâce à des spectromètres de masse à thermo-ionisation et des spectromètres de masse à source plasma multi-collecteur. Bien qu'ils portent des noms différents, ces appareils fonctionnent selon un même principe : vaporiser l'échantillon et créer des ions qui sont ensuite dirigés vers un champ magnétique où ils sont séparés puis détectés par l'utilisation simultanée de plusieurs « collecteurs ». L'usage de l'une ou de l'autre technique dépend essentiellement de la nature de l'élément chimique testé. Toutefois, précise Hélène Isnard : « le dispositif à source plasma-multi-collecteur a l'avantage de pouvoir analyser de très petites quantités de matière : quelques nano-grammes à peine contre plusieurs micro-grammes pour un spectromètre à "thermo-ionisation". De plus, il peut être directement connecté à la sortie d'une des colonnes chromatographiques servant à la séparation préalable des éléments. Cela permet à la fois de gagner du temps, de réduire les quantités de matières radioactives à manipuler (diminuant de fait l'exposition du personnel aux doses radioactives) et de limiter le volume de déchets inhérents à ce type d'activité. »

### Une expertise labellisée par l'AIEA

Grâce à cette suite d'opérations se déroulant sur plusieurs mois, le Lanie est en mesure de fournir aux « neutroniciens » les résultats de l'analyse isotopique de n'importe quel échantillon de combustible irradié. C'est-à-dire de leur livrer, avec une précision inférieure au pourcent voire au pour mille, les teneurs relatives et absolues des isotopes d'une dizaine de ces éléments chimiques : uranium,

#### Spectrométrie de masse

Technique d'analyse et de caractérisation utilisant le mouvement des ions dans les champs électriques et magnétiques d'un instrument afin de les classer en fonction de leur rapport masse/charge.

#### Chromatographie

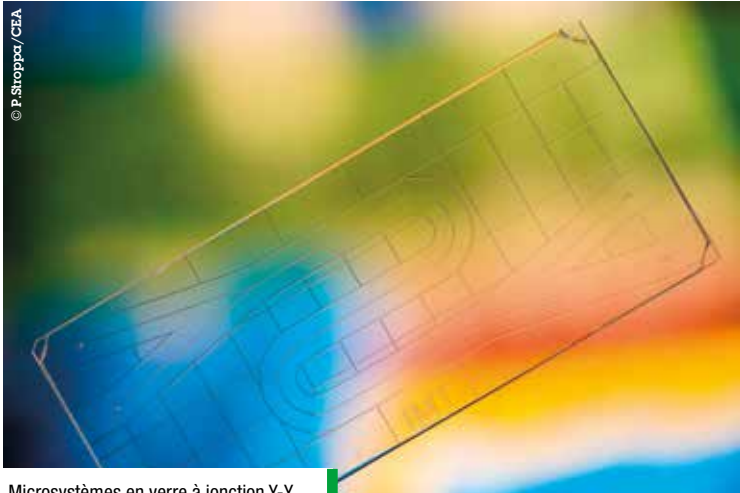
Technique de séparation de substances chimiques qui repose sur des différences de comportement entre une phase mobile liquide ou gazeuse et une phase stationnaire (solide ou liquide).

Note :

1. Installation entièrement renouvelée en 2011.



Analyse isotopique et élémentaire d'échantillons de combustibles irradiés dans le Hall Actineo du Lanie.



Microsystèmes en verre à jonction Y-Y.

plutonium, américium, curium, néodyme... Des performances qui contribuent à sa haute réputation sur le plan international ; et expliquent pourquoi, au terme d'une procédure d'évaluation de trois ans comprenant des essais réalisés en conditions réelles, il a vu en août 2014 aboutir favorablement sa demande d'accréditation auprès de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique). Il est ainsi désormais l'un des trois seuls laboratoires dans le monde autorisé par l'Agence à analyser, en aveugle, les échantillons de matières nucléaires recueillis au cours d'inspections. Un « label » dont on est particulièrement fier ici, mais qui a ses servitudes : « la composition en isotopes du plutonium et de l'uranium des prélèvements envoyés par l'AIEA doit, en effet, être déterminée de façon prioritaire et dans des délais courts : deux voire un mois seulement en cas d'urgence absolue » témoigne Thomas Vercouter.

### À la pointe de la miniaturisation

Diminuer les risques et nuisances liés à de telles manipulations d'échantillons est une préoccupation constante des experts, tout en garantissant les hautes performances d'analyse qui sont le résultat d'efforts continus de recherches et d'innovations en sciences analytiques. Depuis plus de dix ans, le laboratoire mène en effet des recherches dans la voie prometteuse de la miniaturisation des techniques de séparation des éléments, applicables aux analyses de matériaux nucléaires. Hélène Isnard montre l'un des microsystèmes développés : un disque en plexiglas de quelques centimètres de diamètre sur la surface duquel on distingue péniblement, tant ils sont fins, de minuscules sillons. Ces réseaux de micro-canaux, à travers lesquels circulent des fluides, servent à séparer les éléments chimiques par **électrophorèse** capillaire. Ils sont actuellement testés pour séparer le plutonium de l'uranium ou des produits de fission entre eux comme les lanthanides, tout en divisant par cent ou par mille les quantités d'effluents et d'échantillons nécessaires à l'opération. En couplant directement ce microsystème à un spectromètre de masse, la durée totale des analyses pourrait s'en trouver réduite à quelques semaines.

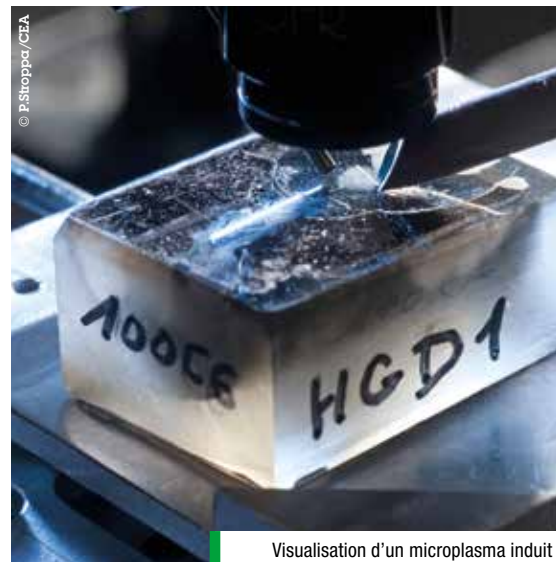
### Electrophorèse

Technique de séparation empruntée à la biologie grâce à la différence de masse de molécules d'intérêt en présence d'un champ électrique.

À un autre étage du bâtiment, Clarisse Mariet travaille, elle aussi, à la conception de microsystèmes séparatifs. Les micro-canaux dans des puces en verre pour l'extraction liquide-liquide et les **Labs-on-CD** pour l'extraction liquide-solide qu'elle présente offrent des solutions innovantes. Ces approches miniaturisées trouvent particulièrement leur intérêt pour des analyses dans le cycle du combustible nucléaire et la gestion des déchets radioactifs ; et elles s'inscrivent dans l'évolution prochaine des laboratoires d'analyses radiochimiques en alliant gains en efficacité et en sûreté.

### Analyser l'inatteignable

Enfin, le Lanie est aussi connu pour être l'un des laboratoires du CEA les plus avancés dans le domaine de la spectrométrie de plasma induit par laser, la « Libs » ; une méthode d'analyse à distance, là où le prélèvement d'échantillon est très difficile voire impossible. Elle consiste à focaliser une impulsion laser sur l'échantillon à étudier afin de le vaporiser sous forme d'un plasma dont le **spectre d'émission** est révélateur de sa composition élémentaire. « Précisément, les atomes et les ions éjectés de l'échantillon émettent un spectre constitué de raies atomiques dont la longueur d'onde permet d'identifier les éléments présents et dont l'intensité varie avec la concentration » explique Jean-Baptiste Sirven. Cette technique d'analyse sans contact a par ailleurs permis aux équipes du Lanie de participer dès 2001 au développement du fameux instrument Chemcam du robot Curiosity de la NASA qui poursuit toujours actuellement son exploration de Mars. Les progrès fulgurants enregistrés au cours de ces dernières années sont tels que la Libs pourrait être bientôt employée pour mesurer, à distance et avec une très bonne précision, certains isotopes dans des matériaux. En ligne de mire : le bore 10 et le bore 11, des isotopes utilisés comme absorbants neutroniques, par exemple dans les barres de contrôle des réacteurs nucléaires ! ♦



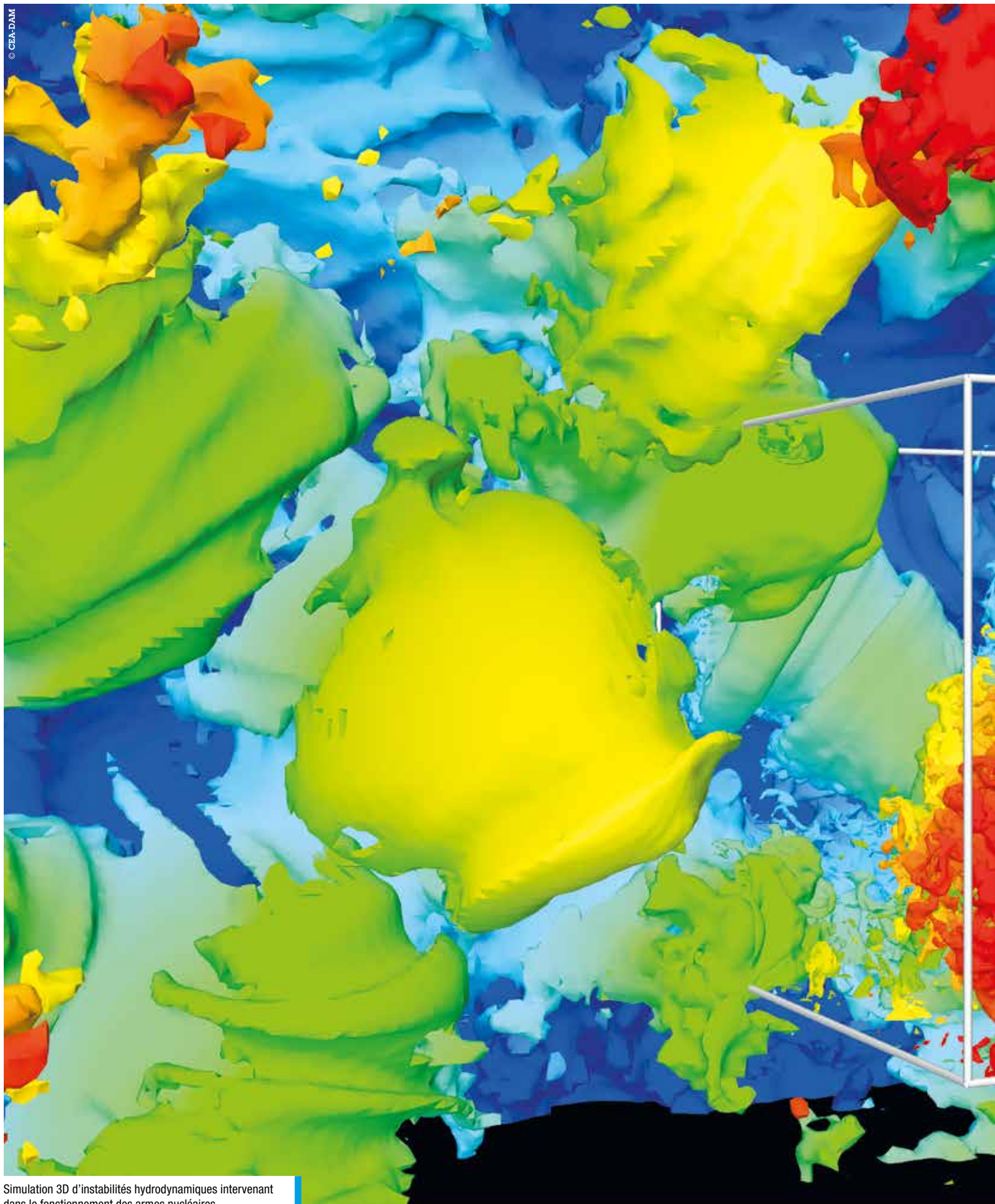
Visualisation d'un microplasma induit par Libs à la surface d'un échantillon.

### Labs-on-CD

Micro-dispositifs sans connectique.

### Spectre d'émission

Intensité lumineuse d'un rayonnement émis par une source, représentée en fonction de sa longueur d'onde dans une gamme allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.



Simulation 3D d'instabilités hydrodynamiques intervenant dans le fonctionnement des armes nucléaires.

Transition numérique

# Le HPC dans le flux des **big data**

P.14

Un écosystème  
pour le calcul  
haute performance  
et les *big data*

P.16

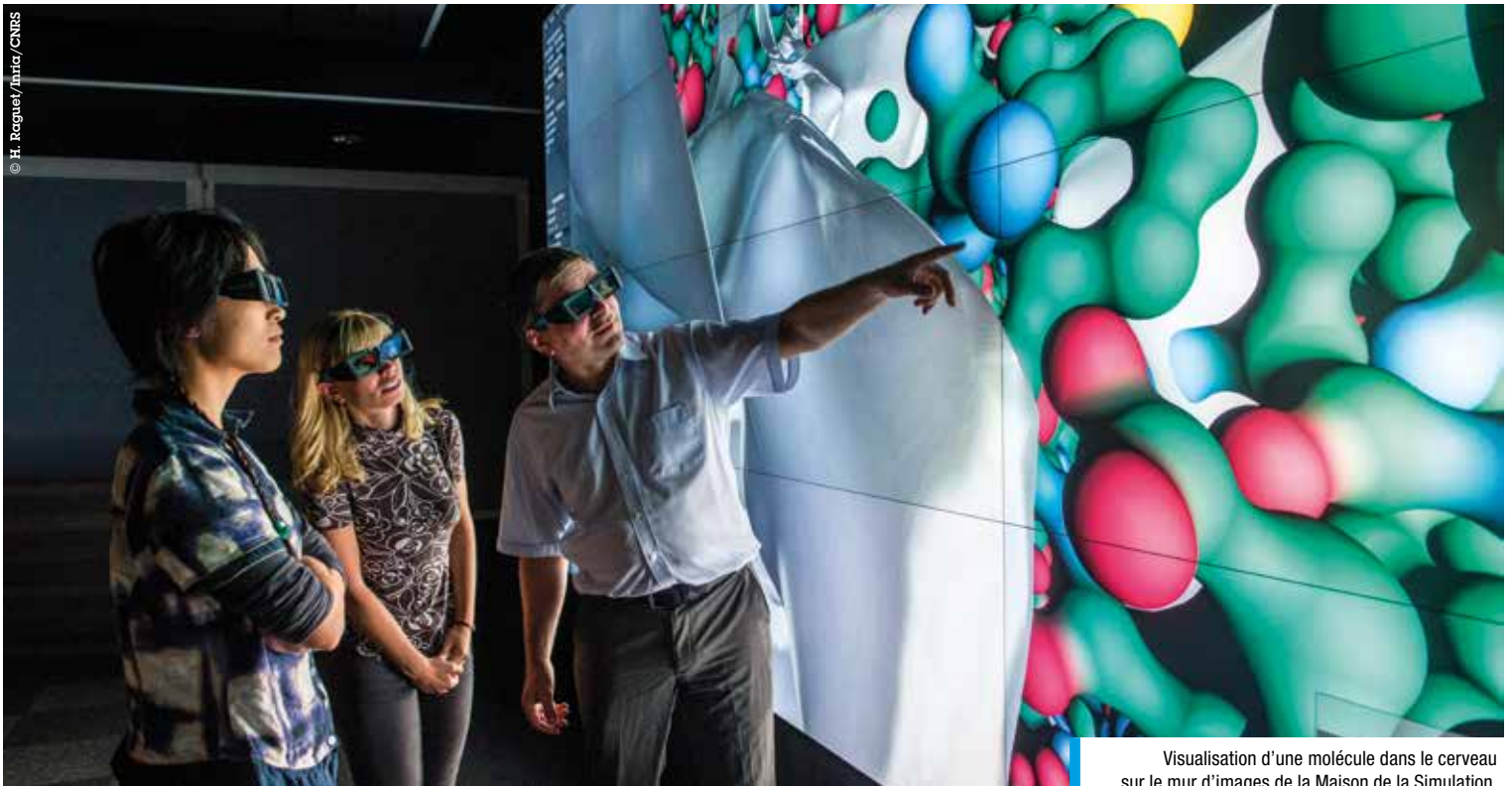
Comment pousser  
les technologies

Si les besoins de la dissuasion nucléaire ont initié la démarche du CEA sur le calcul haute performance (HPC), la problématique traverse désormais l'ensemble de l'organisme et fédère de nombreuses compétences sur l'ensemble de la chaîne de valeur du HPC et une très large part de celle des données massives.

La maîtrise du HPC et des *big data*, et de leurs évolutions, est désormais un enjeu majeur pour l'environnement de la recherche et de l'industrie. Cet impératif mobilise dès lors les équipes du CEA pour « pousser » les technologies et anticiper les ruptures à venir.

par Mathieu Grousson

# CEA : un écosystème pour le calcul haute performance et les big data



Visualisation d'une molécule dans le cerveau sur le mur d'images de la Maison de la Simulation.

À la pointe des technologies, des infrastructures et des applications du HPC et des *big data*, le CEA compte parmi les acteurs incontournables du domaine sur la scène internationale.

**P**rédire l'évolution du climat ; concevoir un réacteur nucléaire ; optimiser la consommation d'un moteur ; déterminer la forme d'une molécule d'intérêt pharmaceutique, etc. Ces problématiques ont un point commun : leur réponse dépend désormais intégralement des outils du calcul haute performance (HPC pour *High Performance Computing*) et des *big data*. Des supercalculateurs extrêmement puissants, dédiés au traitement de volumes massifs d'informations, permettent ainsi de simuler au plus près un phénomène ou d'extraire les corrélations pertinentes d'un grand volume de données.

En la matière, le CEA fait presque figure de pionnier, fort d'un savoir-faire hérité directement de sa mission régalienne de défense. Comme l'explique Didier Juvin, chef du projet Simulation numérique et Calcul intensif à la Direction des applications militaires du CEA (DAM) : « depuis l'arrêt total des essais nucléaires, en janvier 1996, la crédibilité de la dissuasion repose notamment sur un important programme de simulation numérique. Or, du nucléaire aux matériaux en passant par la détonique, l'hydrodynamique et la physique des plasmas, celui-ci implique quasiment toute la physique, à toutes les échelles

spatiales et temporelles. Et la simulation de l'état de la matière portée dans des états extrêmes, avec des pressions de plusieurs milliards de fois la pression atmosphérique et des températures pouvant atteindre le milliard de degrés, nécessite des puissances de calcul extrêmement importantes. » Autrement dit, pour les spécialistes du CEA, la maîtrise de toutes les facettes du HPC constitue un enjeu de souveraineté nationale. Parallèlement, la simulation numérique et l'analyse statistique de quantités massives de données se sont affirmées comme des outils indispensables à la science, tout en étant des piliers de l'innovation et de la compétitivité industrielle.

## « De la recherche duale à l'industrie »

De par sa mission défense, d'un côté, et sa devise « De la recherche à l'industrie »

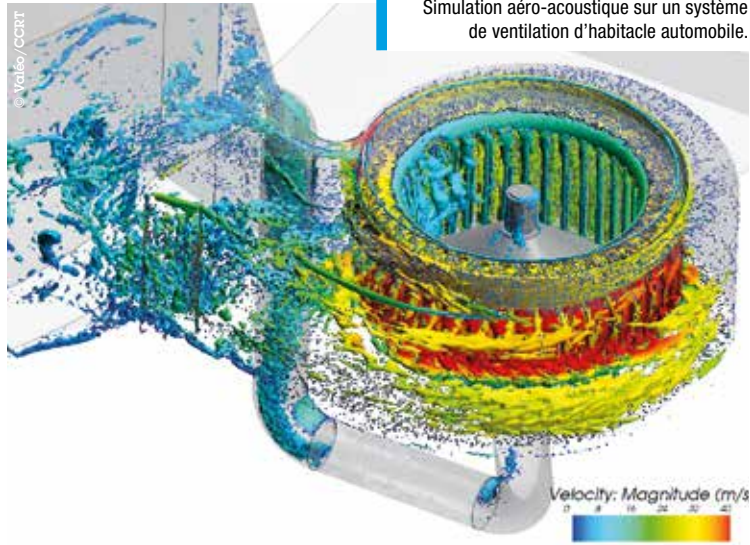
de l'autre, rien d'étonnant à ce que le CEA figure aujourd'hui dans le peloton de tête des solutions HPC de classe mondiale. Celles-ci s'incarnent sur le site de Bruyères-le-Châtel de la DAM depuis 2001, à travers quatre générations de supercalculateurs, « fruits d'un partenariat avec l'industrie, en particulier Bull qui a intégré le groupe Atos, permettant aux industriels hexagonaux de proposer des solutions HPC performantes et compétitives » expose Jean-Philippe Bourgoïn, directeur des affaires stratégiques du CEA et président du comité directeur de l'informatique scientifique au CEA. C'est ainsi qu'en 2010, le supercalculateur du programme Simulation, piloté par la DAM et dédié aux applications défense, Tera100, a été la première machine européenne à franchir la barre du million de milliards d'opérations par seconde, soit 1 **petaflops**. Inaugurée fin 2015, la première tranche de son successeur, Tera1000, affiche quant à elle une puissance de 2,5 petaflops; elle sera complétée en 2017 par une seconde tranche atteignant 25 petaflops, véritable préfiguration des supercalculateurs « **exaflopiques** » du CEA attendus à l'horizon 2020.

**Petaflops**  
Unité de mesure du nombre d'opérations effectuées à la seconde (*Floating Point Operations Per Second*): 1 peta = 1 million de milliards (quadrillion:  $10^{15}$ ).

**Exaflops**  
Un milliard de milliards d'opérations à la seconde (quintillon:  $10^{18}$ ).

**Nous travaillons à développer tous les outils nécessaires à l'utilisation optimale des machines.**

Christine Ménaché, directrice du CCRT



Simulation aéro-acoustique sur un système de ventilation d'habitacle automobile.

Le site de Bruyères-le-Châtel abrite également les infrastructures du Très Grand Centre de calcul (TGCC) du CEA. Pour les besoins de la recherche française en la matière, et européenne (dans le cadre du programme Prace), le TGCC héberge notamment la machine Curie<sup>1</sup> (équipement financé par Genci) d'une puissance de 1,8 petaflops; et, depuis mi-2016, le nouveau supercalculateur Cobalt (1,5 petaflops) au sein du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) regroupant le CEA et ses partenaires industriels. « Si les besoins de la dissuasion nucléaire ont initié la démarche du CEA sur le calcul haute performance, la problématique traverse désormais l'ensemble de notre organisme et fédère

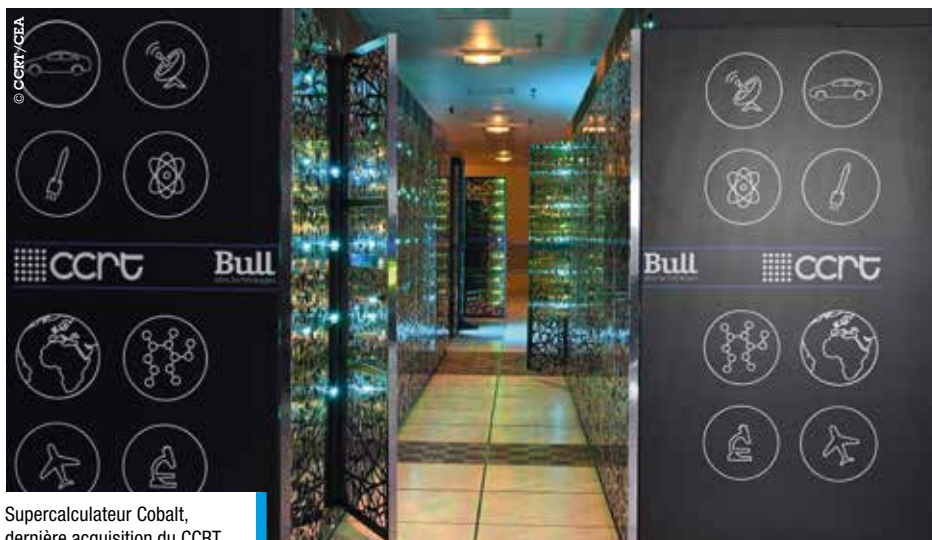
de nombreuses compétences sur l'ensemble de la chaîne de valeur du HPC et une très large part de celle des données massives », résume Jean-Philippe Bourgoïn.

### La face cachée du HPC

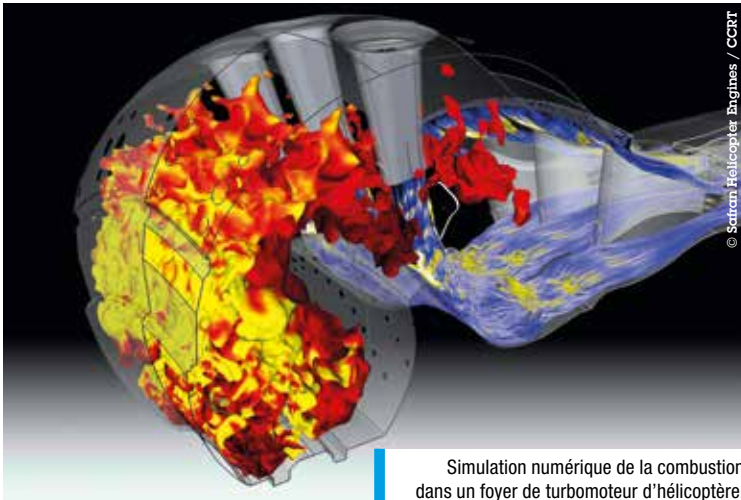
Le CEA a notamment cofondé en 2011 la Maison de la simulation<sup>2</sup> pour : « stimuler le développement de la simulation et l'utilisation d'outils numériques communautaires dans le secteur du HPC. Cela implique une expertise au-delà des seuls calculateurs que nous mettons en œuvre grâce à des équipes pluridisciplinaires (informaticiens spécialistes du calcul intensif et du traitement numérique, mathématiciens appliqués et experts des domaines applicatifs visés) », présente Édouard Audit, directeur de cette structure qui est ainsi en mesure de piloter des programmes d'envergure comme le projet européen EoCoE dédié à la simulation numérique pour la transition énergétique.

En effet, l'approche du CEA ne concerne pas la seule puissance brute des supercalculateurs. « Notre activité consiste également à développer tous les outils nécessaires à l'utilisation optimale des machines : moyens de stockage des données et de visualisation des résultats, logiciels d'aide pour la gestion et l'utilisation des machines, codes de simulation, etc. » rappelle Christine Ménaché, directrice du CCRT. ♦♦♦

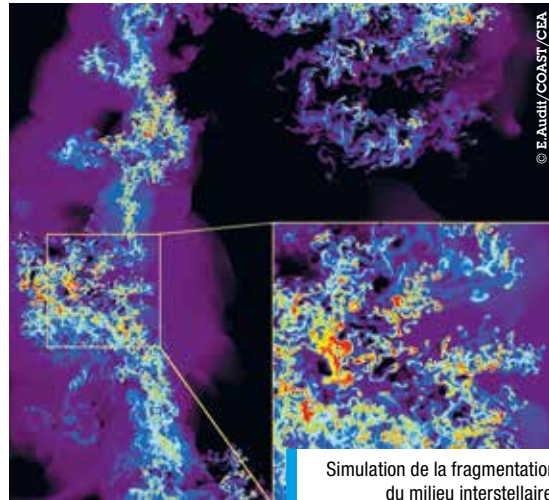
**Notes :**  
1. L'une des dix plus puissantes au monde lors de sa mise en service.  
2. Laboratoire commun créé en 2011 par le CEA, le CNRS, l'Inria et les universités Paris-Sud et Versailles Saint-Quentin.



Supercalculateur Cobalt, dernière acquisition du CCRT.



Simulation numérique de la combustion dans un foyer de turbomoteur d'hélicoptère.



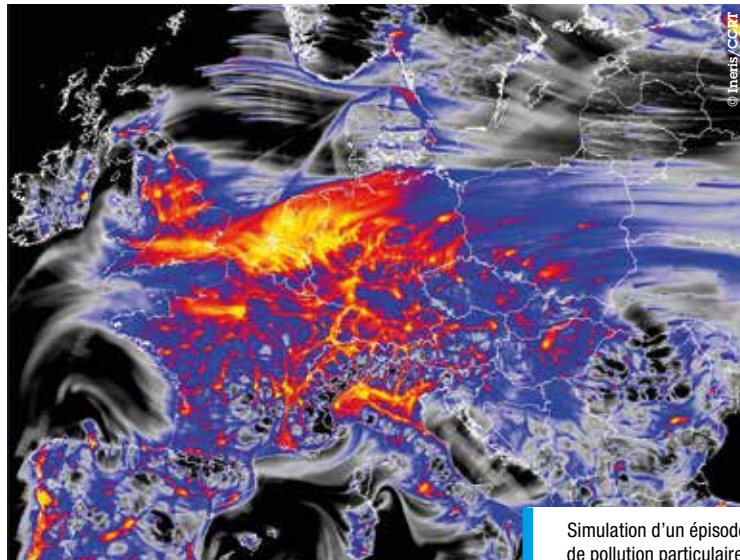
Simulation de la fragmentation du milieu interstellaire.

**Petaoctets**  
Unité de mesure des bits informatique codant une information numérique : un octet est un regroupement de 8 bits ; 1 peta = 1 million de milliards (10<sup>15</sup>).

Par exemple, le projet LUSTRE HSM dédié à la migration des données depuis les disques durs vers des bandes magnétiques « permet d'étendre la capacité de stockage du TGCC de 7 à 25 **petaoctets**, sans que les utilisateurs aient à se soucier de quoi que ce soit. » précise la spécialiste. Par ailleurs, la plateforme logicielle ARCANÉ facilite le travail des équipes chargées du développement des logiciels de simulation sur les différentes générations de calculateurs.

### Des simulations à grande échelle...

Entre 2009 et 2012, un équipement dédié du CCRT a ainsi permis à la communauté climatologique française de participer aux 5<sup>e</sup> exercices internationaux de comparaison entre modèles climatiques (dont la synthèse nourrit une part importante des rapports du GIEC<sup>3</sup>) ; et, entre 2016 et 2019, la sixième édition de ces campagnes comparatives mobilisera au TGCC un environnement spécifique de stockage de 14 petaoctets de données utiles. Autre utilisateur des moyens du CEA, l'Ineris, en charge de l'évaluation et de la prévention des risques environnementaux et technologiques, a pu réaliser une simulation exceptionnelle de la qualité de l'air lors de la vague de pollution de janvier 2009, avec une résolution record de 15 kilomètres, soit une amélioration d'un facteur 200 par rapport à l'état de l'art ! Quant aux exemples



Simulation d'un épisode de pollution particulaire.

d'applications purement industrielles, ils ne manquent pas : Safran a pu réduire de 15 à 20 % la consommation de ses turboréacteurs de dernière génération ; tandis que Valeo optimise ses processus de conception et de développement, en particulier pour les systèmes de refroidissement de moteur automobile ou d'habitacle.

### ... à la gestion des big data

Ces acquis ont conduit le CEA à se positionner sur le terrain des *big data* et qui valent au CCRT d'avoir été choisi en 2012 pour accueillir l'e-infrastructure de stockage et de traitement des données de France Génomique. Ce projet, soutenu par le programme des investissements d'avenir, vise la mutualisation et la

valorisation des ressources des principales plateformes françaises de génomique et bio-informatique, autant dire des milliards de données ! « Pour France Génomique, nous avons fait évoluer l'architecture et les services du CCRT : une partie de l'espace de stockage (plusieurs petaoctets) ainsi que plusieurs milliers de **cœurs de calcul** sont dédiés aux logiciels d'analyse utilisés par les bio-informaticiens », indique Christine Ménaché.

Preuve s'il en fallait que les équipes du CEA sont résolument engagées dans la transition numérique, de la recherche à l'industrie. ♦

**Note :**  
3. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**Cœur de calcul**  
Petite unité de calcul incluse dans un processeur.





Supercalculateur Tera 1000-1 du CEA.

# Comment pousser les technologies...

Les centres de calcul devenant progressivement des centres de traitement de l'information, les problématiques d'énergie, de parallélisme et de gestion des flux de données nécessitent d'optimiser les technologies ; jusqu'à préfigurer celles du futur, basées sur le neuromorphisme et la physique quantique.

**L**, 2,5, 25, sans doute bientôt 1 000 petaflops (1 exaflops)! Dans le monde du calcul haute performance, ce qui frappe immédiatement, c'est la puissance hors norme des supercalculateurs. Mais qu'on ne s'y trompe pas : pour concevoir des machines capables de prouesses calculatoires toujours à la hausse, il ne suffit pas de multiplier à l'infini la vitesse des processeurs ou d'ajouter sans compter des transistors les uns à côté des autres. Comme rectifie

Pierre Leca, chef du département Sciences de la simulation et de l'information à la DAM : « sans l'environnement de calcul, la puissance n'est rien ; ainsi, nos infrastructures informatiques ne sont pas à proprement parler des centres de calcul mais plutôt des centres de traitement de l'information ».

En ce sens, trois mots résument les efforts du CEA pour relever les défis technologiques du calcul haute performance (HPC) : énergie,

**parallélisme**, et données. La problématique autour du premier est simple à comprendre. Aujourd'hui, une machine de 25 petaflops nécessite 5 **megawatts** de puissance électrique ; à technologie équivalente, il faudrait donc 200 megawatts pour alimenter la génération exaflopique à venir : impossible, compte tenu de la puissance électrique disponible en France. Quant au second, il traduit la réalité de superordinateurs au sein desquels travaillent de concert plusieurs centaines de milliers de **processeurs** contenant des millions de cœurs de calcul. « Comment les interconnecter entre eux et avec la mémoire ? Comment y transporter et y réguler les flux de données ? Comment y optimiser des simulations découpées en milliers de sous-calculs quasi indépendants ? Et le tout au moindre coût énergétique. La problématique est globale », résume Didier Juvin, chef du projet Simulation numérique à la DAM.

## Vers la sobriété énergétique

Concernant la consommation énergétique, une première piste concerne la finesse de gravure des transistors : plus elle augmente, plus ♦♦♦

### Parallélisme

Architecture d'électronique numérique permettant de traiter des informations et algorithmes spécialisés de manière simultanée.

### Megawatts

Unité de mesure de la puissance ou du flux énergétique (y compris thermique) : 1 mega = 1 million (10<sup>6</sup>).

### Processeur

Puce électronique comportant des unités de calcul électronique.

la consommation par unité de calcul diminue. Mais ce n'est pas suffisant et les limites de ce qui est faisable commencent à être atteintes. Aussi l'équipe de Marc Duranton, responsable Europe au List, institut de CEA Tech, explore-t-elle plusieurs solutions. Par exemple, simplifier les processeurs à l'image de ce qui est fait dans la téléphonie mobile : « l'idée est de retirer tous les matériels non essentiels autour des cœurs de calcul ; on perd en performances brutes, mais on gagne en efficacité énergétique globale ». Une autre possibilité étudiée consiste à assembler non pas de grosses puces figées intégrant processeurs, mémoire et interconnexions, mais directement entre eux ces éléments composant les puces : « on gagne alors en flexibilité, par exemple en pouvant ajouter si besoin de la mémoire au plus près des cœurs », précise Marc Duranton. Autre constat : déplacer une information demande 1 000 fois plus d'énergie que réaliser une opération élémentaire de calcul ; la limitation des flux de données au sein d'un supercalculateur relève donc de l'impératif catégorique. Une solution pourrait être de mettre les puces les unes sur les autres afin de réduire la distance entre elles, ce que les experts

Note :  
1. Bull eXtrem Interconnect.



Visualisation de traces d'exécution d'un programme à la Maison de la Simulation.

appellent le « 3D stacking » ou « empilement 3D ».

En attendant que l'industrie sélectionne ou non ces innovations, le CEA et ses collaborateurs, au premier rang desquels Atos-Bull, ont mis les bouchées doubles sur le refroidissement des machines et des infrastructures qui les abritent « En 2000, on poussait de l'air dans les salles, se souvient Pierre Leca. En 2010, un système de réfrigérant était placé au plus près des armoires. Désormais, on extrait la chaleur directement sur les cartes électroniques. » Résultat : la part de l'énergie consacrée à refroidir les calculateurs est ramenée de 50 à 10 % de la consommation totale.

### Calculs et données à la chaîne

Autre enjeu de l'optimisation du HPC : le parallélisme et la gestion des flux de données. Actuellement en cours de déploiement dans les infrastructures de la DAM, le supercalculateur Tera1000 intègre par exemple une nouvelle solution performante pour l'interconnexion des **nœuds de calculs** : la technologie BXI<sup>1</sup>, développée par Atos-Bull dans le cadre de sa collaboration avec le CEA. « La mise en œuvre de cette technologie dans ses supercalculateurs amène un réel avantage concurrentiel pour l'industriel français Bull », note par ailleurs Didier Juvin

Défis de l'interconnexion, mais également des flux de données. Ainsi, comme

l'explique Edouard Audit, directeur de la Maison de la simulation, « les codes de calculs et l'ensemble des logiciels doivent refléter les spécifications et les contraintes de la machine ». Dans son laboratoire, algèbre linéaire intelligente, programmation par tâche, théorie des graphes... les experts des mathématiques appliquées et de l'informatique explorent différentes pistes. Dans la perspective de l'exascale, le laboratoire ECR du campus Teratec, sur le site de Bruyères-le-Châtel, travaille par exemple sur des logiciels dont le rôle est de gérer dynamiquement les processeurs au regard des contraintes énergétiques et de parallélisme : « Cette tâche est-elle critique ? Comment la découper au mieux ? Peut-on ralentir tel ou tel processeur lors de son exécution ? etc. »

La question du traitement des données se pose également avec la même acuité. Car, au regard des volumes colossaux produits par la moindre simulation, il est impossible de tout stocker avant l'analyse. À l'inverse, « il faut aujourd'hui traiter les données tout au long de la chaîne qui va de leur production à leur stockage », explique Pierre Leca. D'où le développement de filtres triant à toutes les étapes les infos les plus pertinentes et effaçant au plus vite celles qui ne sont qu'un intermédiaire de calcul. À cet égard et à partir de la génération Tera1000, un nouveau paradigme se fait jour. Avant, seule la puissance de calcul était considérée comme une ressource

### Nœud de calculs

Association d'un (ou plusieurs) processeur, d'une mémoire et d'une carte d'interconnexion. Brique de base des calculateurs.

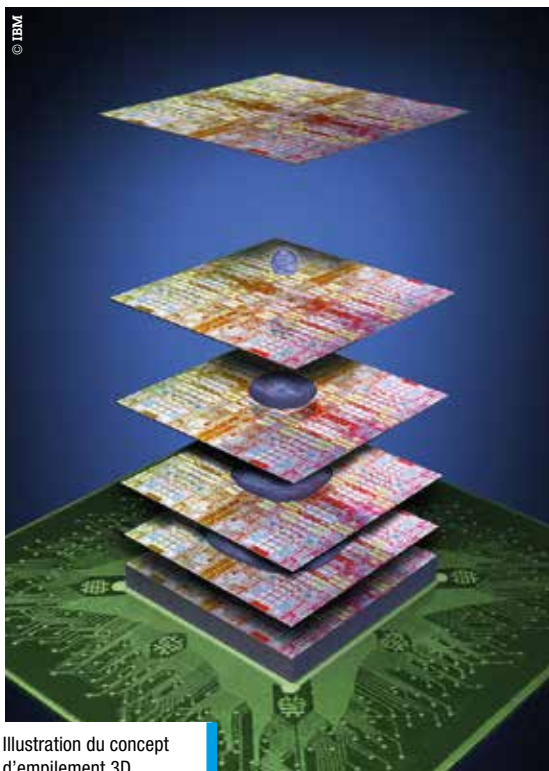


Illustration du concept d'empilement 3D.

à allouer aux utilisateurs, c'est désormais aussi le cas des entrées-sorties de données. De fait, « nous ne pouvons pas nous permettre d'engendrer des déséquilibres entre la capacité de calcul et celle d'évacuer les informations produites », poursuit l'expert.

### Zéro faille

Lire, écrire, déplacer des données : la fiabilité du système est une autre problématique. Comme l'expose Didier Juvin : « plus on multiplie le nombre de cœurs de calculs, plus la probabilité d'une panne augmente ; un supercalculateur exascale aura un risque de dysfonctionnement important toutes les 5 heures, ce qui n'est pas envisageable : il est indispensable de gérer la résilience dès la conception de l'architecture. » En la matière, de nombreuses voies sont exploitées : redondance des composants et des sauvegardes, codes correcteurs d'erreurs, système redistribuant l'information...

Depuis deux ans, les supercalculateurs du CEA sont gérés tels de très grands instruments de recherche : ils sont désormais instrumentés de sorte que toutes les cinq secondes, les exploitants disposent d'un jeu complet d'informations numériques et textuelles sur leur état. Cela permet, d'une part, la détection de signaux faibles précurseurs d'une panne et, d'autre part, une meilleure adéquation entre la machine et les besoins des utilisateurs. « Sur ce thème nous mettons actuellement sur pied une collaboration avec Nicolas Vayatis, spécialiste des méthodes d'apprentissage statistique à l'ENS-Paris-Saclay », ajoute Pierre Leca.

De la microélectronique aux sciences de l'information, en passant par les mathématiques et l'informatique, aucune piste n'est négligée afin de repousser les limites du HPC et des big data.

### Du neuromorphisme à l'ordinateur quantique

Au-delà de l'informatique et de la microélectronique telles qu'on les pratique aujourd'hui, à quoi ressembleront les supercalculateurs du futur ? Les experts du CEA explorent déjà plusieurs pistes qui, à terme, pourraient révolutionner

le calcul haute performance. L'une d'elle consiste à s'inspirer du fonctionnement du cerveau humain (voir encadré). Pour cause, s'il peine à calculer une intégrale ou résoudre une équation différentielle, il est imbattable pour les tâches d'interprétation, de synthèse ou de classification ; de plus, il ne consomme que 20 watts !

Sur le long terme, une autre piste exploratoire repose sur la mécanique quantique. Alors qu'un ordinateur classique manipule des bits susceptibles de se trouver dans deux états 0 ou 1, un ordinateur quantique tire parti des propriétés de la physique quantique qui permet aux entités microscopiques (comme les atomes ou les photons) de se trouver dans des superpositions d'états. D'où la possibilité, en principe, de réaliser des calculs massivement parallèles. Daniel Estève, responsable du groupe Quantronique à l'Iramis, institut de recherche fondamentale du CEA, prévient : « à ce jour, aucun ordinateur quantique n'est capable de dépasser les performances d'un ordinateur classique ». Il n'empêche, plusieurs réalisations à

bases d'atomes, d'ions ou de micro-circuits **supraconducteurs**, tels ceux conçues par l'équipe de Daniel Estève, commencent à préfigurer ce que sera peut-être demain un véritable ordinateur quantique. « Celui-ci ne remplacera probablement pas les supercalculateurs actuels, mais on peut imaginer que pour des applications de niche, un ordinateur quantique assiste à terme un ordinateur classique. » Marc Duranton ajoute : « je pense que les supercalculateurs du futur intégreront une partie HPC semblable à l'existant, une autre plus spécialisée dans l'analyse statistique de grands volumes de données et enfin une partie neuromorphique ». Autant de pistes à suivre. ♦

### Supraconductivité

Phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique à l'extérieur de matériaux « supraconducteurs ».

## Nous ne pouvons pas nous permettre d'engendrer des déséquilibres entre la capacité de calcul et celle d'évacuer les informations produites.

Pierre Leca, chef du département Sciences de la simulation et de l'information à la DAM

## Vers l'apprentissage profond

Les algorithmes de « **deep learning**<sup>2</sup> » intègrent dans leur fonctionnement des principes simplifiés de la circuiterie cérébrale. Ils sont composés de milliers d'unités effectuant de petits calculs simples, le tout organisé en couches successives selon une architecture appelée « réseau de neurones », afin que le résultat de la première couche nourrisse la deuxième et ainsi de suite...

Pour autant, ces algorithmes sont implémentés sur des machines dont l'architecture n'a rien de commun avec un cerveau. D'où l'idée de réaliser de nouveaux processeurs. Les spécialistes du CEA fondent leurs espoirs sur un composant appelé memristor, une minuscule résistance électrique variable à effet de mémoire, capable de mimer le fonctionnement des synapses. « On pourra ainsi construire des réseaux hyperdenses contenant plusieurs milliards de synapses par cm<sup>2</sup> », prédit Marc Duranton du List, institut CEA Tech. Dans ce domaine l'équipe de Vincent Derycke de l'Iramis a développé un procédé d'élaboration performant de memristors organiques, dont la capacité à reconnaître, par exemple, l'écriture manuscrite a été validée par simulation.

### Deep learning

Algorithme d'apprentissage profond qui permet à un programme informatique de reconnaître des images, des sons...

Note :

2. Voir Le point sur des Défis du CEA n° 210



Le Very Large Telescope (VLT), exploité par l'Eso, est situé dans le désert de l'Atacama (Chili).

**Photonique**

## Gravity observe le cœur de la galaxie

Observer les étoiles qui gravitent autour du trou noir situé au centre de la Voie lactée : c'est l'objectif du télescope VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) de l'ESO<sup>1</sup> au Chili. Et le **Leti**, institut de CEA Tech, a contribué à ce que cela soit possible en développant les puces **photoniques** au cœur de l'interféromètre<sup>2</sup> Gravity. Basée sur une technologie de gravure de couches de silice dopée déposées sur du silicium, ces puces permettent de recombinaison la lumière provenant des quatre télescopes du réseau VLTI dans quelques centimètres carrés en assurant compacité, stabilité et précision des mesures. Elles ont été adaptées et optimisées à des longueurs d'onde du domaine spectral requis pour le bon fonctionnement de Gravity (2 à 2,5  $\mu\text{m}$ ), avec de premiers essais concluants. AL

**Photonique**

Technologie générant et traitant des données numériques à partir de photons, tandis que l'électronique met en œuvre la circulation d'électrons.

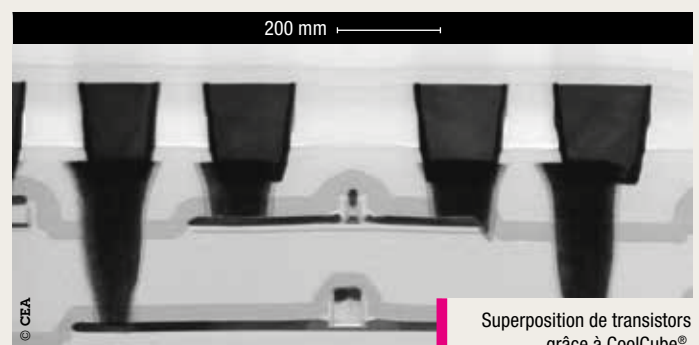
**Notes :**

1. Observatoire européen austral (*European Southern Observatory*).
2. L'interférométrie optique consiste à associer plusieurs télescopes pour gagner en résolution angulaire, afin d'observer dans le ciel des détails de plus en plus fins.

**Microélectronique**

## Plus de 10 millions de contacts 3D au $\text{mm}^2$ !

10 millions de contacts 3D par  $\text{mm}^2$ , contre 100000 pour des solutions classiques : le **Leti** prolonge la *roadmap* de l'intégration 3D avec sa technologie CoolCube®, développée notamment avec IBM et STMicroelectronics. Elle permet de superposer et d'interconnecter des transistors FDSOI avec une précision d'alignement lithographique de l'ordre du nanomètre. Éprouvée en environnement quasi-industriel, CoolCube® offre une alternative à la réduction des dimensions de circuits, dont le coût devient prohibitif. Les chercheurs continuent à améliorer la robustesse du procédé et à réduire la température de certaines étapes pour un transfert industriel d'ici à deux ans. *Minanews*



Superposition de transistors grâce à CoolCube®.

**Électronique de puissance**

## Un convertisseur de puissance qui tient les 200 °C

Fonctionner à une température ambiante de 200 °C, et jusqu'à 250 °C environ : voici les prouesses d'un **convertisseur de puissance** développé et testé en conditions réelles par une équipe du **Leti**. Cette technologie utilise un driver original pour adapter la vitesse de commutation entre 20 et 200 ns, selon le contexte d'utilisation et le risque de perturbations électromagnétiques. Elle pourrait servir dans l'automobile, l'aéronautique ou le forage pétrolier, et pour des applications plus courantes (moteurs d'ascenseur, climatisation, pompes domestiques) afin de réduire, voire supprimer, le refroidisseur. *Minanews*

**Convertisseur de puissance**

Dispositif permettant de changer la forme de l'énergie électrique.

Imagerie médicale

## Nouveau microscope sans lentille

Le laboratoire commun Iprasense - Leti présente le Cytonote Counter. Ce microscope numérique sans lentille à très grand champ (30 mm<sup>2</sup>) mesure la viabilité de cellules avec une reproductibilité et une précision inégalées! Et ce, grâce à une analyse fine des figures d'interférences obtenues. Le marquage au bleu Trypan devient alors inutile, ce qui rend désormais possible une mesure en continu. Enfin, l'observation étant menée sur plusieurs milliers de cellules à la fois, cela confère à la mesure de viabilité sa validité statistique.

Le Cytonote Counter est notamment destiné aux bioréacteurs de l'industrie pharmaceutique, pour le suivi des cultures cellulaires produisant vaccins et anticorps monoclonaux. Trois brevets ont été déposés et Iprasense a déjà signé plusieurs ventes. *Minanews*

Big data

## Les memristors sont de bons élèves !

La révolution des *big data* invite à s'intéresser aux algorithmes de type « réseaux de neurones », très efficaces pour les opérations de classification nécessaires au traitement d'images, par exemple. Ces réseaux sont composés d'éléments de traitement (« neurones ») reliés entre eux par un grand nombre de connexions (« synapses »). Dans ce contexte, des chercheurs de l'Iramis et de l'université Paris-Saclay<sup>1</sup> s'intéressent à de nouveaux composants électroniques moléculaires, les **memristors**, pour lesquels ils mettent au point un procédé innovant. Les memristors développés sont des jonctions métal-organique-métal réalisées par greffage électrochimique de complexes moléculaires. « Ces jonctions permettent de stabiliser de nombreux états de conductivité et présentent un potentiel remarquable d'intégration pour la réalisation de réseaux denses », détaille Vincent Derycke, de l'Iramis. Grâce à un circuit modèle comportant un neurone relié à huit memristors et capable d'apprendre des **fonctions logiques**, les chercheurs ont pu évaluer l'efficacité de deux méthodes d'apprentissage ainsi que leur robustesse vis-à-vis de la variabilité des composants. Et grâce à une simulation numérique portant sur 15 680 memristors, ils ont pu extrapoler le potentiel de ces méthodes vers des fonctions complexes telles que la reconnaissance de chiffres manuscrits. Un résultat qui invite à poursuivre les recherches sur les procédés d'intégration des memristors. *AG*

Thermodynamique

## Quand les petits tourbillons se dissipent

Turbulence

État d'un fluide dans lequel le mouvement présente en tout point un caractère aléatoire et tourbillonnaire.

Quand on agite un fluide, il devient **turbulent** et l'énergie mécanique apportée est finalement dissipée en chaleur, sous l'effet de la viscosité. Des chercheurs CEA et CNRS de l'Iramis ont observé toutefois, à l'échelle millimétrique, d'autres processus de dissipation de l'énergie : « *en éclairant avec un laser de fines particules de verre de 10 microns dispersées dans le fluide, nous avons pu, avec deux caméras haute résolution, cartographier la vitesse du fluide* », explique Bérengère Dubrulle de l'Iramis/SPEC. « *Nous avons ainsi mis en évidence des événements rares, bien localisés et efficaces de dissipation non visqueuse de l'énergie.* » L'observation de cette dissipation autour de structures singulières (fronts, spirales...) impose de nouvelles contraintes sur la gamme des échelles à considérer pour obtenir une simulation numérique fidèle des fluides visqueux. Et ce, avec un enjeu scientifique et technologique important, notamment pour les domaines de l'aéronautique, de la navigation, ou encore l'étude du climat. Ce résultat expérimental pourrait aussi être rapproché de certains travaux mathématiques qui impliquent la présence de singularités dans la solution des équations de la mécanique des fluides. *AL*

Memristor

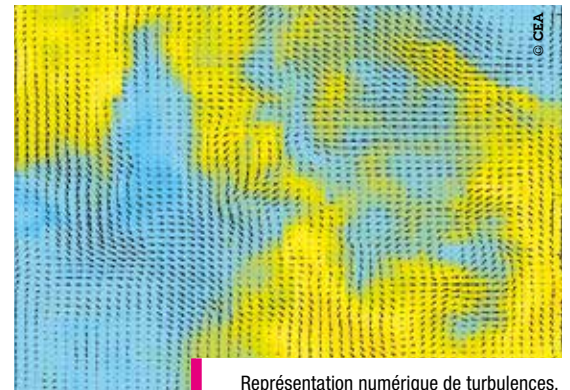
Minuscule résistance électrique variable à effet de mémoire utilisée pour mimer le fonctionnement des synapses.

Fonction logique

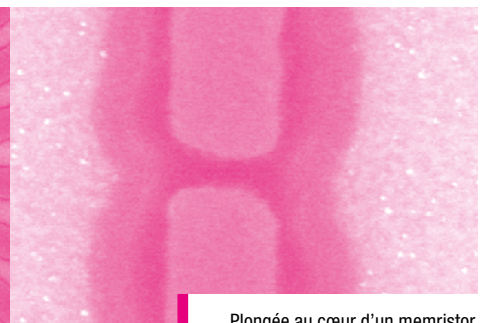
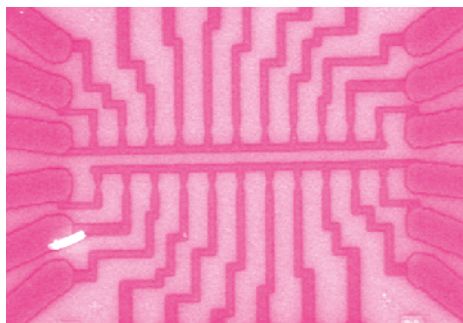
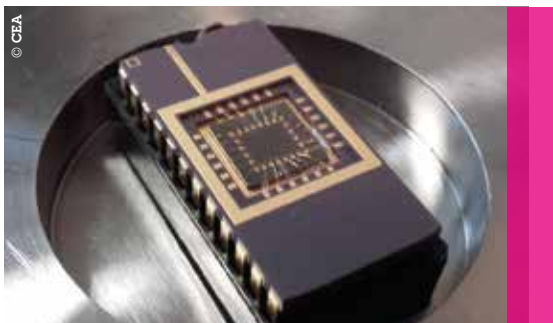
Opération de calcul mathématique.

Note :

1. Laboratoire d'électronique fondamentale.

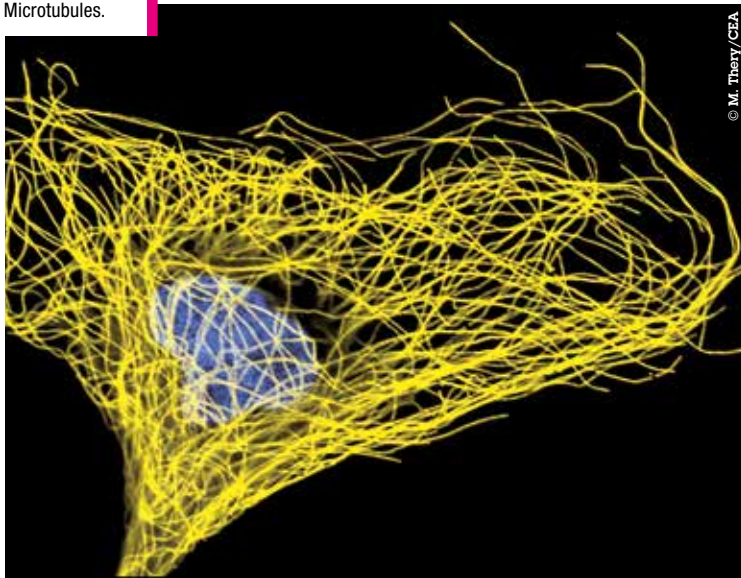


Représentation numérique de turbulences.



Plongée au cœur d'un memristor.

Microtubules.



© M. Théry/CEA

**Biologie cellulaire**

## La jouvence naturelle des microtubules

Les microtubules, filaments rigides faisant partie du squelette des cellules, n'ont pas fini d'étonner les chercheurs. Une équipe du Big démontre qu'ils sont capables de s'autoréparer à l'intérieur même des cellules. « Nous avons marqué par fluorescence des monomères libres de tubuline, constituant des microtubules. En les suivant par imagerie, nous avons constaté qu'ils s'incorporaient non seulement aux extrémités des microtubules pour leur croissance, mais aussi tout le long du filament pour venir réparer des zones endommagées par des stress mécaniques ou des défauts intrinsèques, que nous avons simulés par des impacts laser » explique Manuel Théry, chercheur au Big. Et ce processus de réparation, non content de redonner un coup de fouet au filament, lui permet également d'accroître sa durée de vie! « D'ordinaire, les microtubules se désassemblent complètement à tout instant et de façon aléatoire. Leur durée de vie n'excédant alors pas quelques minutes. Mais dans certains cas, il existe des événements de "sauvetage" au cours desquels cette dépolymérisation s'interrompt et la croissance du microtubule reprend », précise le chercheur. Alors que ce phénomène restait mal compris, les scientifiques observent que tout se passe au niveau des zones réparées qui agissent comme des manchons protecteurs. Les blessures endurées sont donc à l'origine d'une réelle source de jouvence pour les microtubules : plus ceux-ci sont soumis au stress, plus ils sont résistants et vivent longtemps ! Voilà peut-être une source d'inspiration pour le design de nouveaux matériaux dynamiques. AL

**Monomère**

Molécule utilisée pour la synthèse de polymères comme les microtubules.

**Dépolymérisation**

Désassemblage des monomères de tubuline qui forment le microtubule.



## LE VIDE EST LA MATRICE DE TOUT

À l'heure où la longueur des jours décline, rien de tel que remonter le temps, et l'espace, pour une plongée dans le vide. Le vide, matérialisé par le zéro indien, sans lequel n'auraient pu naître les mathématiques ; le vide peuplé d'une matière passée ou en devenir, celui des grands accélérateurs qui révèlent des particules alors virtuelles. Comme toujours, l'astrophysicien Trinh Xuan Thuan aborde patiemment et simplement les grandes notions fondamentales de physique, à grand renfort d'anecdotes historiques et de saveurs philosophiques. Car le vide est résolument un grand tout, et l'affaire de tous... Même s'il a mis des millénaires à s'imposer dans notre compréhension du monde.

La plénitude du vide  
Trinh Xuan Thuan  
Éditions Albin Michel  
20,90 €



## 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.

## DES AMIS QUI VOUS VEULENT DU BIEN?



Aspirateurs, humanoïdes agents d'accueil, joueurs d'échecs... Les robots font de plus en plus partie de notre quotidien et notre société pourrait même s'en trouver modifiée. Alors, quel système juridique pourrait appréhender leur nature si particulière ? Comment les doter des notions de bien et de mal ? Beaucoup de questions pour lesquelles ce nouveau volume captivant livre plus que de simples indices...

**Le robot est-il l'avenir de l'homme ?**  
*Rodolphe Gelin, Olivier Guilhem.*

Éditions La Documentation française. 7,90 €

## UNE ÎLE, UN TRÉSOR



Jamais le Groenland n'a suscité autant d'intérêt qu'aujourd'hui. Couverte à 85 % de glace, la plus grande île du monde, la moins densément peuplée de la planète, a permis de dévoiler des informations exceptionnelles sur les évolutions climatiques passées et sur les changements en cours et à venir. Cet ouvrage invite à la découverte de cet immense laboratoire à ciel ouvert qui fascine les scientifiques internationaux sur le climat, l'écologie et la société.

**Groenland - Climat, écologie, société.** *Valérie Masson-Delmotte & cie.*  
CNRS Éditions. 29 €

## LA POLLUTION JUSQU'AUX ÉTOILES



Le point sur la pollution de l'espace par les débris de satellites. Dans cet essai, l'auteur aborde entre autres : le risque d'accidents et de collisions avec des satellites essentiels aux télécommunications et aux observations scientifiques ; le phénomène inéluctable de croissance exponentielle des objets en orbite ; connu sous le nom de syndrome de Kessler, la désorbitation nécessaire chaque année...

**Pollution spatiale, l'état d'urgence.**

*Christophe Bonnal.*

Éditions Belin. 19,90 €



### Visite virtuelle

## Le TGCC vous ouvre ses portes!

Venez découvrir le Très Grand Centre de calcul de Bruyère-Le-Château à travers sa visite virtuelle hébergée sur le site Internet du CEA. Alors, que la simulation numérique par le calcul haute performance est devenue un outil essentiel de la recherche scientifique, technologique et industrielle, le TGCC dispose de supercalculateurs ultra-performants! Mis à disposition de scientifiques et industriels français et européens, ceux-ci permettent d'exécuter des calculs complexes et de servir ainsi de nombreux domaines : astrophysique, climatologie, biologie, énergie nucléaire... Une exploration passionnante dans une ambiance futuriste!

Et pour les plus curieux, il y a d'autres installations mystérieuses du CEA à parcourir « virtuellement », comme si vous y étiez: le Laser Mégajoule à Bordeaux, le grand centre européen d'imagerie par résonance magnétique NeuroSpin à Saclay, le tokamak pour la fusion Tore Supra à Cadarache, ou encore le Grand Accélérateur d'ions lourds, le Ganil, à Caen...

<http://www.cea.fr/go/visite-tgcc>



30

30 ans  
Cité

EXPO 14.06.16  
> 05.03.17

# MUTATIONS URBAINES

La ville est à nous !

(M) (7) (T) (3b) Porte de la Villette  
[cite-sciences.fr](http://cite-sciences.fr)

Face à une population urbaine toujours plus importante, les initiatives et innovations pour modifier et adapter nos villes sont nombreuses. Certaines sont présentées dans cette exposition autour de trois axes : Villes sous tensions, Terre urbaine et Devenirs.

Conçue en collaboration avec : Avec le soutien de :

