

# les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

226

avril 2018

TOUT  
S'EXPLIQUE

Supplément détachable  
sur l'exosquelette

02

## L'INTERVIEW

- ◆ Sophie Ayrault et Jean Armengaud exploitent la phylopeptidomique appliquée à l'analyse environnementale des sols ◆

04

## HOMMAGE

- ◆ Le rayonnement de Monsieur Hawking ◆

06

## ACTUALITÉ

- ◆ Les mégaprojets ont leur maquette numérique ◆ 2<sup>e</sup> déposant français de brevets en Europe ◆ France, Québec : voyage en génomique ◆ MindSphere Center : la transformation digitale de l'industrie se précise ◆ Engie et le CEA : accord renouvelé ◆ Deux collaborations sous le soleil indien ◆

08

## SUR LE VIF

- ◆ De nouveaux tests pour contraindre la résistance des bactéries ◆ Des services climatiques pour l'industrie énergétique ◆

19

## SCIENCES EN BREF

- ◆ MegaCam ou l'archéologie galactique ◆ Comprendre les bienfaits du proche infrarouge ◆ Les UV de basse énergie abiment notre ADN ◆ Trappist-1 ou la mémoire de l'eau ◆ Quand les électrons partent en ville ◆ L'atome a son hologramme ◆ Contrôles *in situ* des produits radio-pharmaceutiques ◆ Syndrome de Sjögren : la piste des micro-ARN ◆

23

## KIOSQUE



Dossier P.12

## Dans les pas des exosquelettes

**SOPHIE AYRAULT,**  
*Chimiste environnementale au LSCE*

**JEAN ARMENGAUD,**  
*Directeur de recherche en sciences  
« omiques » à l'Institut des sciences  
du vivant Frédéric-Joliot*



## Vers un nouvel outil de diagnostic environnemental ?

Elle analyse les polluants des sols ; il scrute les micro-organismes présents dans tout type d'échantillon par une approche originale : la phylopeptidomique. Sophie Ayrault et Jean Armengaud, que rien ne prédisposait à un travail commun, ont imaginé le projet Geomics, dans le cadre de DRF Impulsion. Leur sujet d'étude ? Les micro-organismes des sols et sédiments du bassin de la Seine.

*Propos recueillis par Sylvie Rivière*

### Comment est né ce projet commun ?

**Jean Armengaud :** Nous nous sommes rencontrés à l'occasion d'un séminaire CEA sur les aérosols, au cours duquel je présentais notre nouvelle méthode : la phylopeptidomique, appliquée à l'identification de micro-organismes pathogènes. Cette approche originale permet, par spectrométrie de masse et grâce à des logiciels spécifiques développés au laboratoire, de recenser sans *a priori* tous les organismes présents dans un échantillon complexe. Nous analysons à la fois l'ensemble des protéines présentes (c'est le protéome), mais aussi les génomes et les **ARN** produits (le transcriptome) pour décrypter le fonctionnement des micro-organismes. En trois à cinq heures, nous accédons à deux informations. L'une est d'ordre taxonomique : les micro-organismes sont identifiés, ou, s'ils ne figurent pas dans nos bases de données, sont rattachés à un rang taxonomique. L'autre information porte sur les fonctions réalisées par ces protéines, et donc sur les voies métaboliques actives dans l'échantillon.

**Sophie Ayrault :** Dès la parution de l'appel à projets DRF Impulsion, j'ai proposé à Jean d'appliquer sa méthode à des échantillons de sols

et de sédiments. Au LSCE, nous étudions les contaminations actuelles et passées dans ces milieux. Nous avons notamment une très bonne connaissance des sols et sédiments du bassin de la Seine, sous pression anthropique depuis plusieurs centaines d'années. Grâce à la datation et à l'analyse des carottes sédimentaires que nous prélevons, notamment en aval de Paris, nous sommes capables de suivre l'histoire de ces contaminations. Elles sont toutes d'origine humaine. Nous retrouvons notamment la présence d'antibiotiques, de métaux ou encore d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

### D'où la naissance du projet Geomics...

**S.A. :** Il s'agit d'une idée très originale, à la croisée de la géochimie, de la biologie et de l'écologie. Nous allons confier nos échantillons de sols, prélevés dans le bassin de la Seine, à l'équipe de Jean. Pour enfin savoir comment les contaminations cumulées au fil des ans ont agi sur le **microbiote** du sol. Allons-nous observer des adaptations rapides de ces communautés ou bien une adaptation plus progressive ? Existe-t-il des voies enzymatiques de dégradation de polluants aujourd'hui disparus dont il ne resterait que la trace écologique ?

### 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.



**J.A. :** Nous avons également pour ambition de développer un outil de diagnostic environnemental totalement innovant, applicable à tout site impacté par des activités anthropiques. Il permettra, à partir de l'analyse des communautés microbiennes présentes dans les sols, de nous renseigner sur les pollutions présentes et passées. J'ajoute que le microbiote des sols est peu connu à ce jour. Seul 1 % de ces micro-organismes est cultivable et caractérisé ! Grâce à Geomics, nous allons également pouvoir étoffer nos connaissances, et ainsi améliorer nos bases de données.

### Comment avez-vous procédé ?

**S.A. :** L'idée dans un premier temps était de développer l'outil de diagnostic environnemental à partir d'échantillons connus, pour à terme pouvoir l'utiliser sur tout type d'échantillons. Nous avons donc fourni à l'équipe de Jean des échantillons très bien contextualisés, c'est-à-dire datés, caractérisés, et avec une histoire de pollution connue.

**J.A. :** Tout était à faire, il a fallu développer et optimiser de nouveaux protocoles pour extraire les protéines de ces prélèvements de sol. Une fois les protéines extraites, nous les coupons en **peptides** grâce à une protéase, puis analysons ces milliers, voire ces millions, de fragments par spectrométrie de masse. Nous avons également accompli un effort important en bio-informatique. Nos logiciels permettent l'identification taxonomique ou encore la

reconstitution des protéines à partir de peptides. Nous devons désormais élaborer les logiciels qui permettront d'établir les corrélations entre le microbiote, les activités enzymatiques et la présence des polluants.

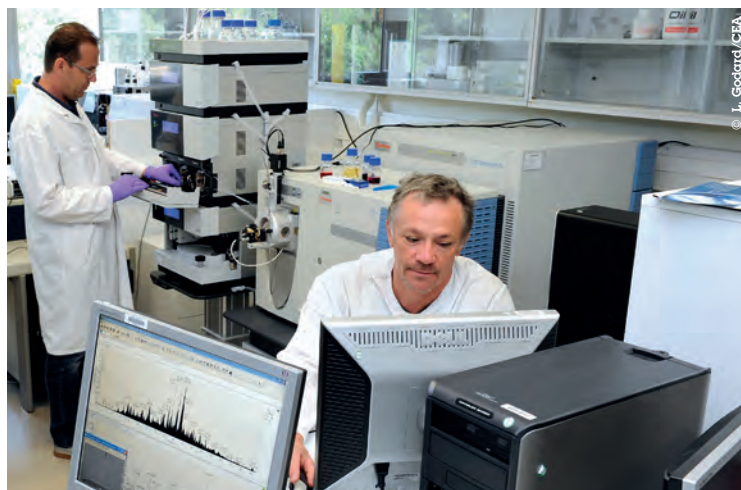
### Quels sont vos premiers résultats ?

**S.A. :** Le projet a été lancé en septembre 2016, avec les premières collectes d'échantillons tests. Nous savons maintenant que la méthode fonctionne, et que notre outil est utilisable et efficace.

**J.A. :** Nous avons notamment montré que microbiote et contaminants sont corrélés. Nous avons déjà pu découvrir certains micro-organismes particuliers, dont les enzymes sont impliquées dans des voies de dégradation de matières organiques. Nous commençons aussi à collecter des données sur le microbiote du sol. Les échantillons que nous avons étudiés sont composés de 70 % de bactéries, 10 % de levures et champignons et 20 % d'autres organismes, qui peuvent être des **archées**, des parasites ou des micro-algues par exemple. Un tiers de ces bactéries est inconnu, mais nous arrivons à les classer dans les groupes taxonomiques appropriés.

### À quelles applications destinez-vous votre outil de diagnostic ?

**J.A. :** De nombreux industriels pourraient être intéressés par cet outil rapide, dès lors qu'il s'agit de qualifier un sol. L'Inra s'est déjà manifesté. Par exemple pour établir



La phylopeptidomique, technique développée au CEA, s'appuie sur la puissance et la rapidité de spectromètres de masse à très haute résolution (ici, en arrière-plan).

des prédictions sur la fertilité de sols, ou pour déterminer l'impact de l'agriculture intensive sur la capacité fonctionnelle des sols.

**S.A. :** Nous avons été contactés par une société de diagnostic, qui doit répondre à un besoin croissant d'analyse de sols en milieu urbain avant le lancement de programmes de construction.

### Quelle suite envisagez-vous ?

**S.A. :** Nous devons désormais poursuivre nos travaux à une plus grande échelle : avec plus d'échantillons, aussi bien en aval qu'en amont de Paris, et en remontant dans le temps à chaque endroit. Pour cela, il nous faut caractériser le microbiote de chaque carotte de sol, cm par cm. Nous devons aussi éprouver notre méthode sur d'autres sites. Notre objectif est de démontrer la corrélation entre polluants et microbiote.

**J.A. :** Avec Sophie, nous accueillerons également une jeune chercheuse dans le cadre du programme de « thèses phares amont-aval » du Haut-Commissaire à l'énergie atomique pour développer le volet bio-informatique du projet Geomics. Nous avons pour objectif de finaliser la mise au point de notre outil de diagnostic environnemental, et pensons proposer une méthodologie complète, depuis le choix du site jusqu'à l'interprétation des résultats. ♦



Carotte de sédiments prélevée au fond du lac du barrage de Pannecières, en amont de la Seine, à l'occasion d'une vidange. Loin de toute agglomération, ces sédiments gardent la trace de l'empreinte atmosphérique de la région parisienne.

### Notions clés

#### ARN

Acide nucléique essentiel dans l'interprétation du message génétique et la synthèse des protéines.

#### Microbiote

Ensemble des micro-organismes vivant dans un écosystème donné.

#### Peptide

Petite chaîne d'acides aminés, ces derniers étant les constituants des protéines.

#### Archées

Micro-organismes unicellulaires procaryotes (sans noyau dans la cellule).

# Le rayonnement de **Monsieur Hawking**

Par Étienne Klein

Il a eu la chance de le rencontrer en 2008, lors des rencontres Science et humanisme à Ajaccio. Étienne Klein, directeur de recherche au CEA, revient sur l'une des théories de Stephen Hawking : l'évaporation des trous noirs, phénomène selon lequel un observateur regardant un trou noir peut détecter un infime rayonnement de corps noir, le « rayonnement de Hawking ».

**M**ême achevée, toute vie se prolonge hors d'elle-même, dans le ciel qu'elle devient pour d'autres vies. Stephen Hawking vient de disparaître, mais son « rayonnement » demeure, le mot étant ici à prendre à tous les sens du terme.

Ses premiers travaux concernaient les trous noirs et, justement, leur « rayonnement ». L'histoire commence au début des années 1970 lorsqu'un jeune physicien, Jacob Bekenstein, prend pleinement acte d'un aspect surprenant de la gravitation. On avait déjà remarqué que les lois d'évolution

des trous noirs s'expriment de façon curieusement semblable aux lois de la thermodynamique. Par exemple, la surface d'un trou noir s'accroît de façon irréversible lorsqu'il absorbe de la matière ou du rayonnement. En outre, la rencontre de deux trous noirs aboutit à la formation d'un nouveau trou noir, dont la surface est plus grande que la somme des surfaces des deux trous noirs présents au départ. Ces propriétés suggèrent un rapprochement possible entre la surface d'un trou noir et la notion d'entropie, à laquelle est associé le deuxième principe de la thermodynamique (qui indique que tout système isolé a une entropie qui ne peut que croître). Jacob Bekenstein associa donc à tout trou noir une entropie, donc une température<sup>1</sup>. Mais comment parler de la température d'un trou noir, qui suppose que de la chaleur est émise par lui, alors même que rien n'est censé pouvoir en sortir ?



Stephen Hawking, invité prestigieux du 50<sup>e</sup> anniversaire de la Nasa, en 2008.

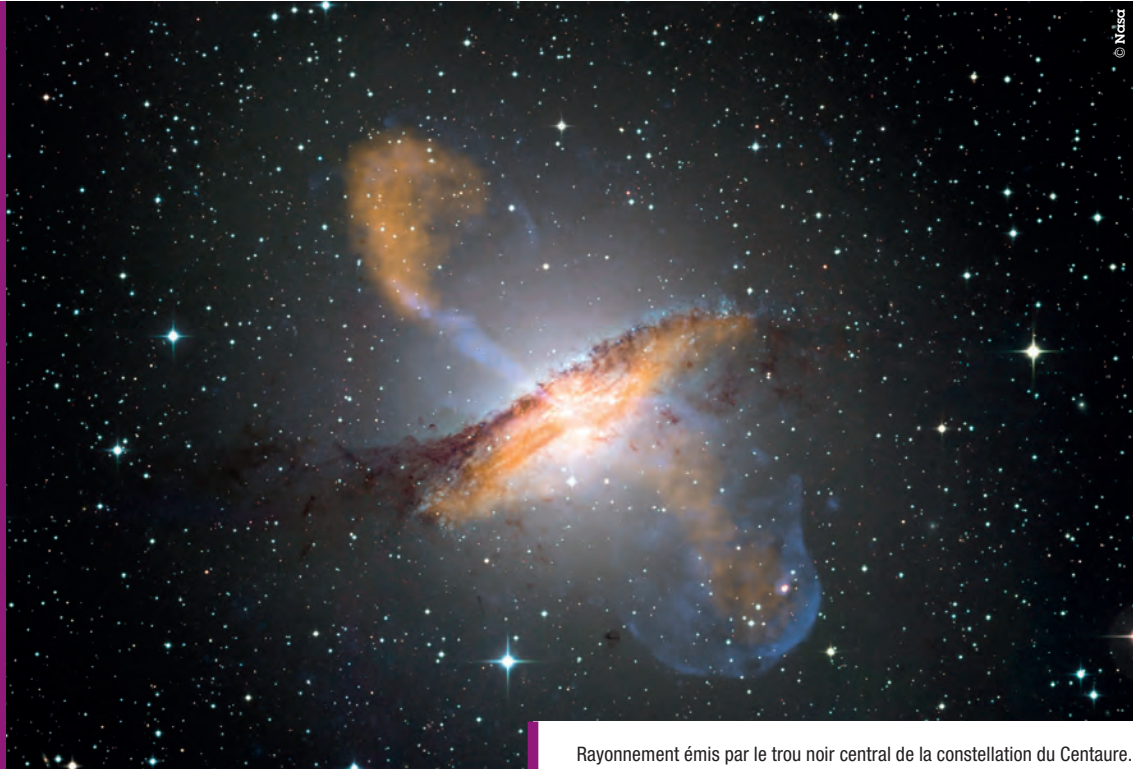


**Gravitation, physique quantique et thermodynamique**

Cette contradiction apparente fut remarquée par Stephen Hawking. Sachant qu'un trou noir s'installe rapidement dans un état stationnaire, il en tira la conclusion que la formation d'un trou noir équivaut à une perte radicale d'information : « *Le trou noir, écrit-il, est indépendant de la composition du corps, matière ou antimatière, ainsi que de sa forme, qu'elle soit sphérique ou très irrégulière.* » Il ne garde donc aucune trace de son origine, ni de son histoire.

**Le trou noir est indépendant de la composition du corps, matière ou antimatière, ainsi que de sa forme, qu'elle soit sphérique ou très irrégulière**

Stephen Hawking



Rayonnement émis par le trou noir central de la constellation du Centaure.

seules propriétés observables sont sa charge électrique, son moment cinétique et sa masse, tous les autres détails de sa composition et de son histoire préalable nous demeurant parfaitement inaccessibles. Stephen Hawking en conclut que tout trou noir pouvait être mis en équilibre avec un rayonnement thermique de température non nulle, donc qu'effectivement les trous noirs émettent de l'énergie, comme s'il s'agissait de corps chauds ordinaires. Autrement dit, ils « s'évaporent », même si c'est à un rythme très faible. C'est la physique quantique, dont les principes ne sont guère compatibles avec ceux de la théorie de la relativité générale, qui rend compte de ce phénomène : le vide quantique est plein de paires de particules et d'anti-particules virtuelles qui sans cesse se matérialisent puis s'annihilent ; dans un trou noir, au bord de sa surface, un des membres d'une telle paire peut retomber dans le trou noir, tandis que l'autre, sans partenaire avec lequel s'annihiler, peut s'échapper dans l'infini. Elle apparaît ainsi comme un rayonnement émis par le trou noir, bien sûr appelé « rayonnement de Hawking ».

**Un univers sans bord**

Dans le prolongement de ces travaux menés aux frontières de la théorie de la relativité générale et de la physique quantique, Stephen Hawking s'intéressa bien sûr aux commencements de l'univers, dont la physique présente certaines similarités avec celle d'un trou noir. Il explora certaines pistes, notamment celles qui aboutissent à l'idée que le concept même d'origine de l'univers se perd dans les brumes quantiques de l'espace-temps, où les histoires s'enchevêtrent et se superposent, et où le concept de condition initiale devient lui-même problématique. Les concepts d'espace et de temps que nous utilisons pour situer et penser l'origine de l'univers ne seraient en somme que des concepts émergents qui n'ont surgi qu'à partir d'un certain moment de l'histoire de l'univers. Parler d'une origine temporelle de l'univers n'aurait donc aucun sens. Stephen Hawking a proposé une conjecture, celle d'un « univers sans bord », selon laquelle l'univers est de volume fini mais n'a pas de limite, ce qui implique qu'il n'a pas eu de commencement. ♦

On peut donc en principe se débarrasser dans un trou noir de tout ce que l'on veut, qu'il s'agisse de matière ou d'antimatière, et ce que l'on peut ensuite observer depuis l'extérieur ne permet plus de « remonter » au contenu même du trou noir. Ses

**08 JANVIER 1942**

Naissance de Stephen Hawking, le même jour que le décès de Galilée, 300 ans auparavant.



**14 MARS 2018**

Décès de Stephen Hawking, le même jour que la naissance d'Einstein le 14 mars 1879.



**Note :**

1. La température d'un système est le quotient de la variation de son énergie et de la variation concomitante de son entropie.

**WWW**

Retrouvez l'intégralité de cet article d'Étienne Klein sur le site *The Conversation*, media en ligne d'information et d'analyse de l'actualité indépendant qui publie des articles grand public écrits par les chercheurs et les universitaires.  
<https://theconversation.com>

**THE CONVERSATION**



**Ingénierie**

## Les méga projets ont leur maquette numérique

Dans le domaine des transports publics et ferroviaires, la gestion de projets d'aménagements d'envergure, tels que l'implantation d'une nouvelle ligne de métro ou la réalisation d'un réseau de voirie urbaine, est extrêmement complexe. En partenariat avec Egis, groupe international de conseil et d'ingénierie, de montage de projets et d'exploitation, le List a développé une nouvelle plateforme logicielle dédiée : Exegis. Elle centralise toutes les données liées à l'avancement du projet – spécifications, contraintes, cadres réglementaires, coordination des différentes phases de travaux et des différents acteurs, gestion des coûts et des délais, etc. Son atout majeur est d'intégrer l'ensemble des logiciels déjà utilisés en routine par les différents acteurs du projet. Véritable maquette numérique du projet, Exegis facilitera l'identification des problèmes et la prise de décision. Son déploiement est prévu d'ici fin 2018. *SR*



**Ententes de partenariat**

## France, Québec : voyage en génomique

Le CEA, le *biocluster* Genopole et Génome Québec signent deux ententes internationales de partenariat scientifique en génomique. La première, conclue entre le CEA et Génome Québec, vise à valoriser les données génétiques et généalogiques des populations québécoise et française, en favorisant l'identification de variations génétiques potentiellement récentes et délétères. « Cette collaboration s'inscrit parfaitement dans l'ambition du CNRGH<sup>1</sup> de développer les meilleures stratégies scientifiques innovantes pour continuer à décrypter le catalogue de gènes dont les mutations sont responsables de maladies », a ainsi annoncé son directeur Jean-François Deleuze. La seconde entente concerne le Genopole et Génome Québec autour de la définition d'un cadre opérationnel pour le développement de la génomique et des sciences « omiques », au travers notamment de collaborations scientifiques et technologiques. *AG*

**Note :**  
1. Centre national de recherche en génomique humaine du CEA.

### 2<sup>e</sup> DÉPOSANT FRANÇAIS DE BREVETS EN EUROPE

Avec 544 demandes de brevets déposées en 2017, auprès de l'Office européen des brevets (OEB), le CEA est le deuxième déposant français, après Valéo. Le CEA est ainsi en mesure d'accompagner le déploiement européen de ses partenaires industriels (grands groupes, PME, ETI ou start-up) sur des marchés innovants.

Quelques chiffres supplémentaires :

**165 590** Nombre de demandes de brevets auprès de l'OEB (3,9 % de hausse) : États-Unis (26 %), Japon (18 %), Allemagne (15 %), Japon (13 %), Chine (9 %), Corée (6 %), France (5 %)

**1<sup>er</sup>** Place du CEA parmi les organismes de recherche devant les instituts Fraunhofer (Allemagne). *AG*



Plateforme collaborative

## MindSphere Center : la transformation digitale de l'industrie se précise

« La valeur industrielle devient indissociable du monde virtuel qui ouvre la voie aux services basés sur l'exploitation des données et devient la principale source de création de valeur », a indiqué le vice-président de Siemens lors du lancement officiel, avec le CEA, du MindSphere Center. Dédié au développement de solutions numériques (du digital à la *data intelligence*) pour les processus industriels, il accueillera plus d'une centaine de personnes issues des équipes de Siemens, du CEA et de start-up françaises, telles que Braincube, éditeur et intégrateur de solutions *Cloud*, spécialisé dans l'intelligence artificielle au service de l'industrie. Il vise deux objectifs principaux : aider les industriels à mieux exploiter les données numériques et sécuriser leurs systèmes d'information ; développer de nouvelles applications pour le MindSphere et l'Internet des Objets (IoT). Pour cela, il sera installé au cœur du DigiHall, pôle de recherche sur les technologies du numérique et de l'intelligence artificielle de Paris-Saclay, co-initié par le CEA. AG



Lancement du MindSphere Center au salon Global Industries Paris, par le ministre de l'Économie et des Finances entouré du directeur du CEA-List (gauche) et d'un représentant de Siemens (droite).



Simulation de l'interaction bulles de gaz au sein d'un écoulement turbulent liquide.

Accord de recherche

## Engie et le CEA : accord renouvelé

Engie et le CEA signent la poursuite de leur accord en matière de R&D dans le domaine de l'énergie nucléaire, et s'engagent pour deux nouvelles années d'études. Au programme : l'amélioration des performances et de la sûreté des réacteurs ; le développement de la connaissance des phénomènes d'évolution des matériaux, des équipements et des composants ; le démantèlement, la déconstruction et l'assainissement d'installations nucléaires ; et enfin la maîtrise de la radioprotection, de la gestion des rejets et des déchets. SR

Accord de coopération

## Deux collaborations sous le soleil indien

Dans le cadre du déplacement du président de la République en Inde, du 10 au 12 mars 2018, le CEA signe deux accords de coopération dans les domaines de l'énergie solaire et du stockage de l'énergie. Le premier, avec le Nise (*National Institute of Solar Energy*), vise à mettre en place des coopérations de recherche et de transferts technologiques.

Le second engage Vikram Solar, entreprise indienne de premier plan dans le secteur de l'énergie solaire. Il s'agira de développer, avec le CEA, des technologies de rupture : amélioration du rendement des cellules photovoltaïques, optimisation de l'utilisation des batteries dans les véhicules électriques, évaluation en France des technologies CEA de modules solaires fabriqués par Vikram Solar.

Alors que l'Inde ambitionne d'installer 100 gigawatts électriques d'origine solaire d'ici à 2022, le CEA se positionne comme un de leurs partenaires de premier plan. SR



Inauguration de la centrale solaire d'Engie, dans l'Uttar Pradesh par le président de la République française et le Premier ministre Indien.

Diagnostic

# De nouveaux tests pour contrer la résistance des bactéries

Alors que la résistance aux antibiotiques ne cesse de progresser dans le monde, de nouveaux tests de détection des bactéries résistantes, issus de la recherche CEA, viennent d'être commercialisés.

Des outils supplémentaires mis à la disposition des hôpitaux pour lutter contre ce fléau de santé publique.

par Sylvie Rivière



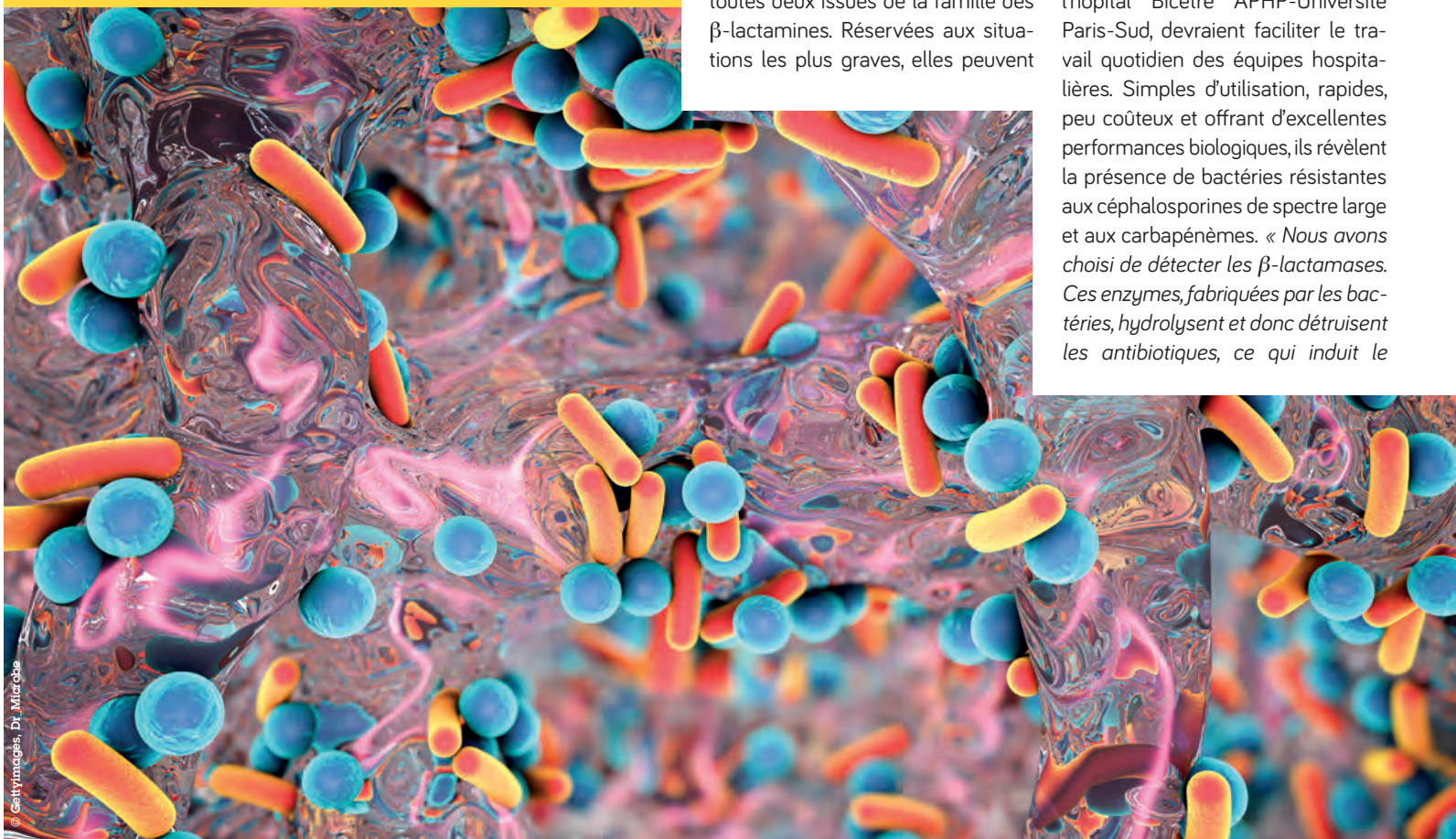
*La résistance aux antimicrobiens est une urgence sanitaire mondiale qui va mettre en péril les progrès de la médecine moderne* », déclarait en septembre dernier le Dr Tedros Adhanom Ghebreyesus, Directeur général de l'OMS. Les phénomènes de résistance aux antibiotiques ne cessent en effet de s'accroître dans les hôpitaux, mais aussi dans les élevages, grands consommateurs d'antibiotiques.

Même les molécules les plus performantes sont concernées par ce fléau mondial, comme les céphalosporines à large spectre et les carbapénèmes, toutes deux issues de la famille des  $\beta$ -lactamines. Réservées aux situations les plus graves, elles peuvent

être désormais totalement inactives ! Repérer le plus rapidement possible ces résistances est par conséquent crucial. Isoler les malades porteurs de ces bactéries permet d'éviter la dissémination de ces agents pathogènes à d'autres patients hospitalisés, une mesure extrêmement efficace pour préserver l'efficacité des antibiotiques dits « de dernier recours ».

## Détecter les $\beta$ -lactamases

Les deux tests de détection récemment mis sur le marché par NG Biotech, issus de travaux de recherche associant le CEA et une équipe de l'hôpital Bicêtre APHP-Université Paris-Sud, devraient faciliter le travail quotidien des équipes hospitalières. Simples d'utilisation, rapides, peu coûteux et offrant d'excellentes performances biologiques, ils révèlent la présence de bactéries résistantes aux céphalosporines de spectre large et aux carbapénèmes. « Nous avons choisi de détecter les  $\beta$ -lactamases. Ces enzymes, fabriquées par les bactéries, hydrolysent et donc détruisent les antibiotiques, ce qui induit le



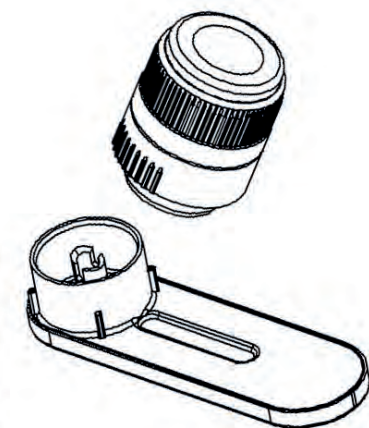
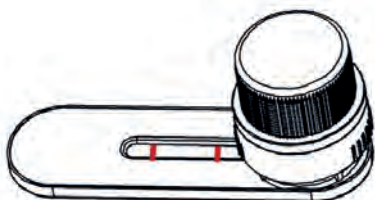
© Gettyimages, Dr. Miarobe



phénomène de résistance », explique Hervé Volland, chercheur à l'Institut Frédéric Joliot du CEA. Le principe est celui du test de grossesse. Il utilise des anticorps qui vont reconnaître les  $\beta$ -lactamases. Le résultat apparaît en moins de 15 minutes sous la forme d'une bandelette colorée, à partir d'une culture de bactéries prélevées dans l'urine ou le sang du patient infecté. Le premier test cible les bactéries résistantes aux pénicillines et aux céphalosporines, antibiotiques parmi les plus prescrits. Le second détecte les bactéries résistantes aux carbapénèmes. Cinq des principales enzymes impliquées sont ici identifiées. Une première mondiale qui permet de révéler cinq antibiorésistances en une seule fois.

### Un test en 15 minutes chrono

Comment aller encore plus vite ? C'est ce que propose un nouveau dispositif, développé dans le cadre du projet BL-DetecTool<sup>1</sup>, coordonné par Hervé Volland. « Ce test, en cours de validation, permettra de s'affranchir des 16 heures requises pour la mise en culture de l'échantillon », commente l'expert. L'analyse sera directement réalisée sur des prélèvements de sang, d'urine, ou de lait s'il s'agit d'un élevage, avec un résultat obtenu en moins de 15 minutes ! Le système



Schémas de principe (à gauche) et prototype du test BL-DetecTool (à droite).



Image de gauche : test de détection de la résistance aux pénicillines et aux céphalosporines.

Image de droite : test de détection de la résistance aux carbapénèmes. Chaque initiale (sauf C pour « contrôle ») représente la ligne de détection pour un type d'enzyme antibiorésistant.

intègre à la fois la préparation de l'échantillon et le système de détection. En pratique, l'échantillon subit *in situ* une étape de lyse qui éclate les cellules sanguines tout en préservant les bactéries, puis une filtration qui permet sélectionner les bactéries. « Pour l'étape de développement, nous utilisons l'impression 3D qui permet de tester rapidement différentes configurations du dispositif, et ainsi d'optimiser son architecture afin de répondre aux différentes contraintes : simplicité, rapidité, faible coût et sensibilité de l'analyse. L'enjeu est de produire dès cette année 1 500 dispositifs pour les

tester dans les trois hôpitaux partenaires, en France, en Espagne et en Hongrie. Avec un objectif : adapter leur utilisation aux pratiques des cliniciens pour une commercialisation en 2019 », poursuit Hervé Volland. Autres atouts s'ajoutant à l'extrême rapidité du test, le système est portable et fonctionne sans électricité, ce qui le rend utilisable partout, aussi bien dans les hôpitaux que sur une exploitation d'élevage, voire dans n'importe quelle région ne disposant pas d'infrastructures hospitalières. ♦

#### Note :

1. BL-DetecTool a été retenu dans le cadre de l'appel à projet « Innovation » 2017 de l'EIT Health (Institut européen d'innovation et de technologie).



Climatologie

# Des services climatiques pour l'industrie énergétique

Coordonné par le CEA, le projet européen Clim4Energy vient de s'achever. Il propose aux industriels de l'énergie ainsi qu'aux décideurs publics des « produits » climatiques. L'accès aux variabilités climatiques et aux indicateurs énergétiques doit leur permettre de mieux gérer les réseaux, de prévoir les investissements et de réaliser des scénarios de politique énergétique.

par Patrick Philippon

Note:

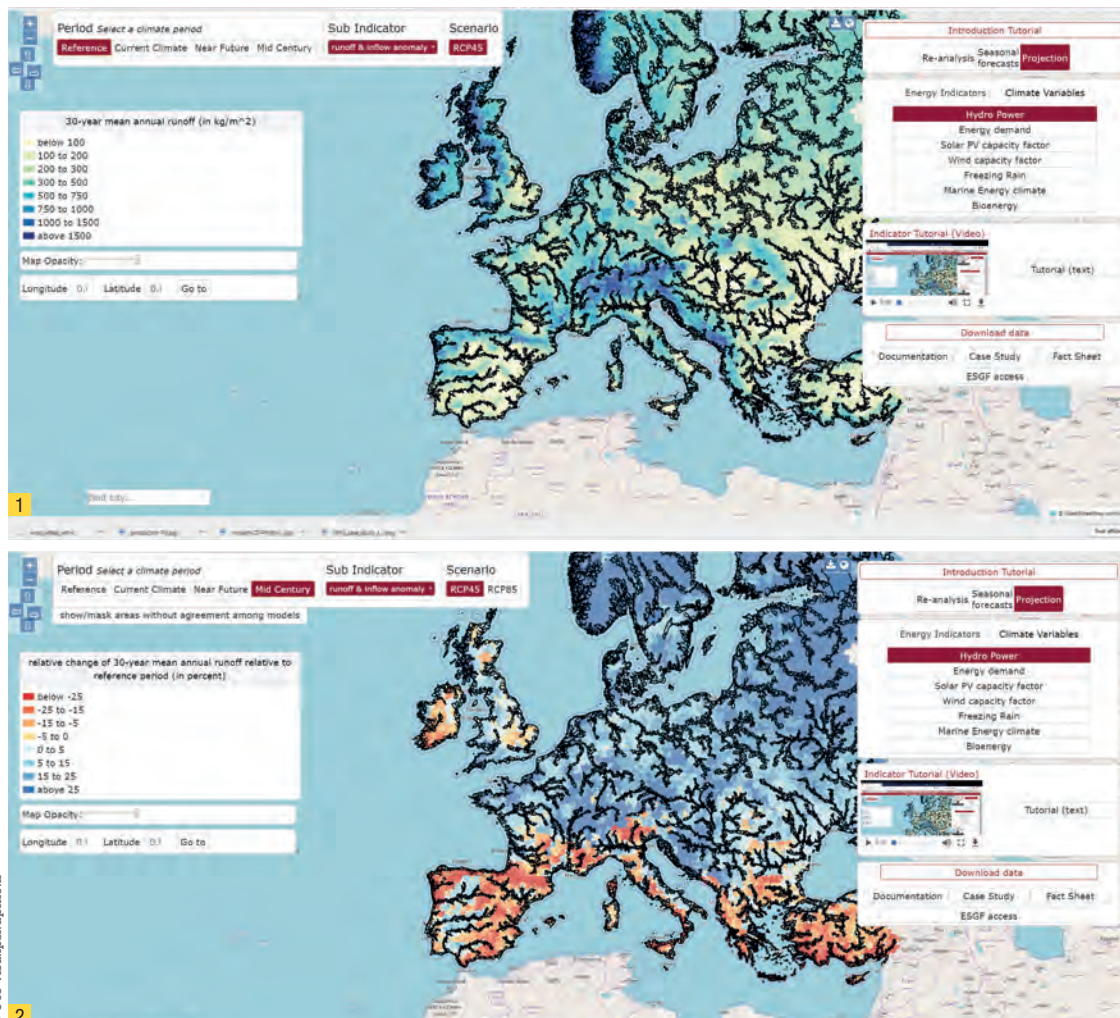
1. Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (CEPME, Reading, Royaume-Uni) qui héberge par ailleurs le programme C3S.

Le climat et la production d'énergie sont indissolublement liés. Non seulement, car l'industrie de l'électricité doit minimiser ses émissions de gaz à effet de serre mais aussi, en retour, parce que le climat influence la production et la demande. Que l'on songe par exemple au vent pour l'éolien, à l'ensoleillement pour le solaire ou aux vagues de froid pour la demande... « Faut-il planifier la maintenance de mon parc d'éoliennes pour ce printemps ? » « Est-il pertinent d'installer une ferme solaire à cet endroit ? » « Dois-je renforcer mes lignes pour résister à la pluie verglaçante ? » Autant de questions auxquelles producteurs et distributeurs ne peuvent répondre qu'avec une vision claire des conditions climatiques à venir. Et ce, à des échéances allant bien au-delà de la prévision météorologique à quelques jours.

## Un démonstrateur opérationnel en ligne

Les partenaires du projet européen Clim4Energy, coordonné par le LSCE, l'ont bien compris. « Nous avons deux ans de travail financés par la Commission européenne via le programme Copernicus Climate Change Service (C3S). Il s'est agi de mettre au point des "services climatiques" pour l'industrie et les décideurs publics », présente Robert Vautard, porteur du projet et climatologue au LSCE.

Ainsi, lors du colloque final à Paris les 5 et 6 mars derniers, c'est un démonstrateur opérationnel inédit qui a été présenté, et mis en ligne. Désormais, tout industriel ou bureau d'études peut se connecter, choisir une région, un indicateur climatique (quantité d'eau entrant dans un bassin-versant pour l'hydro-électricité, facteur de charge éolien, probabilité de pluie verglaçante...) ainsi qu'une échelle de temps (de la saison



Le démonstrateur présente des données de référence puis des projections sur différentes périodes. Par exemple : moyenne annuelle de la capacité hydro-électrique entre 1981 et 2010 (1) et variations calculées à la moitié du siècle (2036-2065) (2).



à venir à plusieurs décennies), pour obtenir quantité de données et réaliser des scénarios applicatifs. Un succès tel que cette première réalisation pourrait rapidement se transformer en un véritable service public pérenne et en constante amélioration, porté par le CEPMMT<sup>1</sup>; la Commission souhaitant favoriser l'émergence d'un marché de l'adaptation au changement climatique.

### Anticiper fiablement la demande et les capacités de production

Outre la coordination du projet et fort de son expertise, le LSCE a proposé deux types de produits pour que les industriels se repèrent plus rapidement et pertinemment dans la kyrielle de données des onze modèles climatiques utilisés. « Nous avons fourni un important travail de traitement de données afin que les variabilités climatiques soient présentées de manière uniforme pour ces onze modèles. Par ailleurs, nous avons développé une fonctionnalité permettant de n'afficher dans le démonstrateur que les points pour lesquels 80 % des modèles sont d'accord », explique Robert Vautard.

Parallèlement, les partenaires du projet ont proposé aux industriels des indicateurs énergétiques appropriés à leurs besoins spécifiques. Le LSCE a ainsi développé avec EDF une méthodologie pour sélectionner les quelques modèles les plus représentatifs parmi les onze. À la clé: un maximum d'informations dans des temps de calcul réduits. Autre étude, celle de RTE et de Météo France qui se sont intéressés aux grandes vagues de froid. À partir de l'analyse des épisodes de 1985 et 2012, il s'agissait de représenter des situations extrêmes de déséquilibre entre la demande et la production; comme lorsque les conditions de production d'énergies solaire et éolienne ne furent pas d'un grand renfort car très basses en France, à l'inverse de l'Espagne ou de la Belgique. « Grâce à ces cas d'étude, les industriels du secteur de l'énergie peuvent

accéder directement à des indicateurs énergétiques qui sont plus pertinents pour les prises de décision, indique le climatologue. Par exemple, en tant que transporteur, RTE a surtout besoin de connaître les capacités de production d'autres pays pour anticiper les prix et besoins d'importation en cas de vague de froid. »

### Affiner les politiques de transition énergétique

L'échelle européenne du projet prend alors tout son sens puisqu'aucun acteur ne peut obtenir de telles données auprès de son service météorologique national. Or, le réseau électrique est interconnecté...

De manière générale, un tel outil pourrait également aider les décideurs à affiner les politiques de transition énergétique, comme les Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE) en France. « Les données climatiques devraient permettre d'évaluer des scénarios de transition et la vulnérabilité des différents modes de production », souligne Robert Vautard. ♦

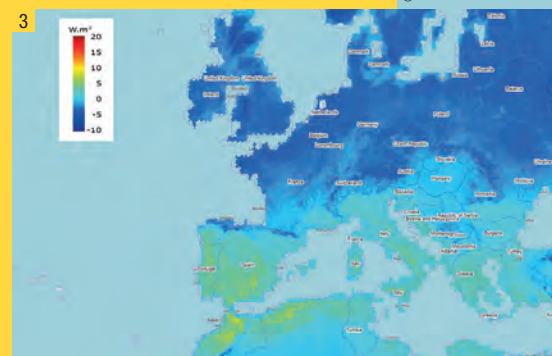
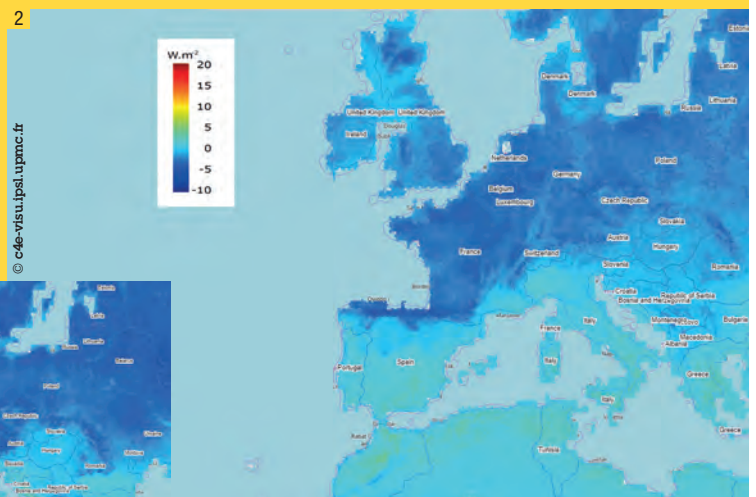
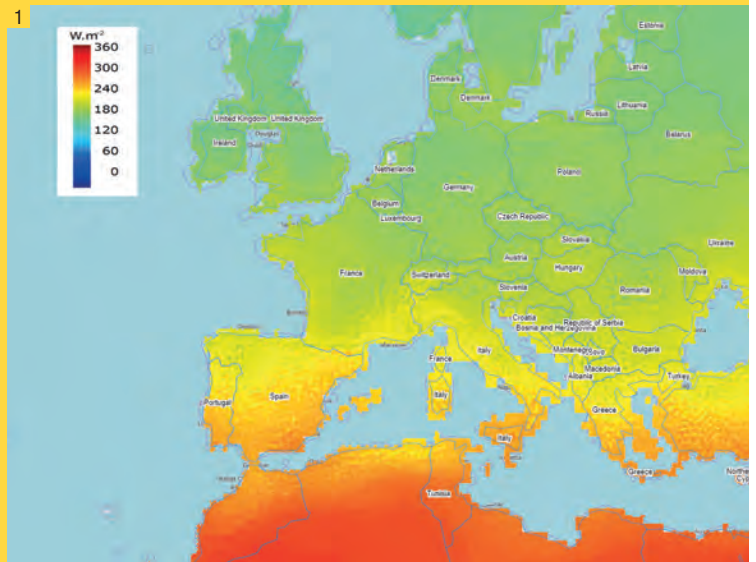
### WWW

Retrouvez toutes les présentations  
<http://clim4energy.climate.copernicus.eu>  
<http://c4e-visu.ipsl.upmc.fr/>

## LES PARTENAIRES

Le programme Clim4Energy associeit

- des centres de recherche et/ou de calcul : CEA, CNRS, BSC (Espagne)...
- des centres météorologiques : Météo France, SMHI (Suède), FMI (Finlande), Met Office (Royaume Uni), Gericis (Allemagne)...
- des industriels : EDF, RTE, Fingrid (Finlande), Vattenfall (Suède), Shell, Total, EDP Renewables...



Relevé, entre 1981 et 2010, du taux d'ensoleillement moyen (en W/m<sup>2</sup>) du printemps (1).


Projections des variations d'ensoleillement au printemps, pour les périodes 2001-2030 (2), 2016-2045 (3), et 2036-2065 (4).




Philippe Garrec, dans les pas de l'exosquelette Hercule Slim, développé au CEA-List pour l'assistance au port de charges.



# Dans les pas des exosquelettes



P.14  
Retour  
aux  
origines



P.15  
Assistant  
exosquelette

P.17  
Des cobots  
« ultimes »

Able, Hercule, Emy... la famille des exosquelettes du CEA n'en finit pas de s'agrandir. Développés à l'origine pour la manipulation de matières radioactives, ils ont gagné en dextérité et en force. Ils investissent désormais de nombreux domaines, du médical à l'industrie, en passant même par les travaux publics !

Qu'ils relèvent de la robotique collaborative ou de la cobotique, leurs deux fonctions principales sont pour l'instant l'assistance à la mobilité et le port de charge. Le CEA, pionnier dans leur développement, reste dans le peloton de tête des laboratoires les plus avancés au monde.

par Vahé Ter Minassian

# Retour aux origines



© L. Godart/CEA

Vue partielle du hall où le CEA met au point des exosquelettes et autres cobots.

Nés du besoin de pouvoir manipuler en toute sécurité, donc à distance, des matières radioactives, les bras télémanipulés du CEA se sont perfectionnés au fil des ans. Aujourd'hui, et forts des progrès réalisés en informatique et en microélectronique, les roboticiens conçoivent des exosquelettes pour l'industrie et le médical.

Concentré sur son écran d'ordinateur, Franck Geffard, ingénieur-chercheur au CEA-List, est occupé à de mystérieuses manipulations. Face à lui, un visiteur dont la moitié supérieure du corps est enchâssée dans le carcan métallique de « Able », attend ses instructions. « Commencez par relâcher complètement votre membre supérieur droit », lui commande-t-il. « Êtes-vous prêt ? Maintenant bougez le gauche. »

Miracle ! Sans que l'ordre lui en ait été donné, le bras droit se met spontanément en mouvement reproduisant, fidèlement, et en miroir, les déplacements du membre gauche. En haut, en bas, à gauche, à droite ; flexions, extensions du poignet, de l'avant-bras, de l'épaule ; rotations abductions, adductions... Pas de doute. Tout est parfaitement et instantanément imité !

« Able » n'est pas le dernier jouet à la mode. Il est, comme l'indique Philippe Garrec, également ingénieur-chercheur du List : « le premier des exosquelettes de bras, contrôlé en effort, mis au point par l'équipe Robotique interactive du CEA-List. Dans sa version actuelle, chaque membre supérieur est équipé de sept articulations pilotées par des actionneurs innovants. » Développée entre 2003 et 2011, cette machine pourrait un jour rejoindre les centres hospitaliers ou les ateliers des usines. Conçue initialement comme une « orthèse active » (à savoir un appareillage adaptatif capable de compenser en temps réel, en les amplifiant ou en

les restreignant à volonté, les fonctions déficitaires de patients en rééducation ou handicapés), elle a été testée durant plusieurs mois à l'hôpital de Garches. Elle a ensuite rejoint les centres d'essais du constructeur automobile PSA, en vue d'évaluer son intérêt pour soulager certaines tâches d'ouvriers.

## Les premiers bras maître-esclave

« Able » est loin d'être seul. Dans le hall encombré de robots industriels où s'activent les chercheurs, le visiteur peut admirer d'autres exosquelettes. Des exosquelettes au CEA ? Retour aux sources, celles de l'industrie nucléaire qui se pose, dès la fin des années 1940, la question de savoir comment manipuler en toute sécurité, et donc à distance, les matières radioactives. Apparaissent d'abord des pinces, puis des bras mécaniques, avant qu'un ingénieur américain de l'Argonne National Laboratory (États-Unis) parvienne, en 1954, à mettre au point le premier télémanipulateur électronique, un bras capable de restituer au niveau de la poignée de commande, la sensation des efforts produits par la pince de saisie de l'objet à déplacer. Intérêt de l'invention : elle fonctionne à l'électricité, ce qui permet d'éloigner l'opérateur de la chaîne blindée, pour plus de sécurité. La France est également dans la course. Dès 1965, Jean Vertut, ingénieur au CEA, développe un télémanipulateur mécanique avant d'inventer le premier robot manipulateur électronique français : le MA22, auquel succède en 1974 le MA23, un bras « maître-esclave » capable de reproduire en les amplifiant les efforts appliqués sur sa commande. Pareille technologie pouvant avoir de multiples usages, l'idée est alors avancée de la tester pour d'autres applications que celles liées au nucléaire. C'est le fameux programme « Spartacus » piloté par l'Iria (l'ancêtre de l'Inria). Objectif : rendre à un patient tétraplégique un certain degré d'autonomie,



en lui offrant la possibilité de déplacer des objets en actionnant par de simples hochements de tête un bras artificiel fourni par le CEA, inspiré du MA23. Forts des progrès réalisés en informatique et en microélectronique, d'autres projets vont suivre, dont la station « Master » d'aide aux personnes handicapées qui vaudra au CEA de recevoir la Médaille d'or de l'innovation 1995 de la Commission européenne.

**Sans engrenages, le vérin à câble reproduit fidèlement les efforts, sans être gêné par les frottements.**

Philippe Garrec, ingénieur-chercheur du List-CEA

### Moins encombrants et plus légers

En ce qui concerne les exosquelettes, à proprement parler, la réelle percée intervient en 2000, lorsque l'équipe LRI du List se lance dans l'ambitieux projet de fabriquer un successeur au bras-maître MA23 dont le coût est trop élevé. Elle dépose à cette fin le brevet d'un nouveau mécanisme d'amplification des efforts : le vérin à câble. Tout comme celui « à moufle » qui équipait le MA23, le nouvel actionneur est « transparent » : « *dépourvu d'engrenages, il reproduit les efforts de façon fidèle, sans être gêné par les frottements et par les forces nécessaires à leur mise en mouvement* », explique Philippe Garrec. Grande première, il propose aussi un moteur qui peut non seulement être orienté dans le sens du câble de transmission, mais aussi placé à distance de la pièce qu'il est censé entraîner. Résultat : un gain appréciable de place, couplé à la possibilité inédite d'embarquer ces actionneurs sur des structures articulées, sans trop les alourdir ou augmenter leur volume. Une solution idéale lorsqu'il s'agit d'équiper orthèses, prothèses et autres bras ou jambes robotisés des exosquelettes, systèmes dont il s'agit justement de limiter le poids et l'encombrement. Depuis, les recherches au CEA vont bon train... ♦

#### Notes :

1. École d'ingénieurs.
2. Brevet CEA.

## Assistant exosquelette

D'« *Alien* » à « *Star Wars* », en passant par « *Edge of Tomorrow* », le cinéma a accordé une large place à ces armures robotisées censées démultiplier les capacités physiques des êtres humains... Dans le monde réel, les recherches actuelles sur les exosquelettes visent deux types d'applications : l'assistance au port de charge et à la mobilité des personnes.

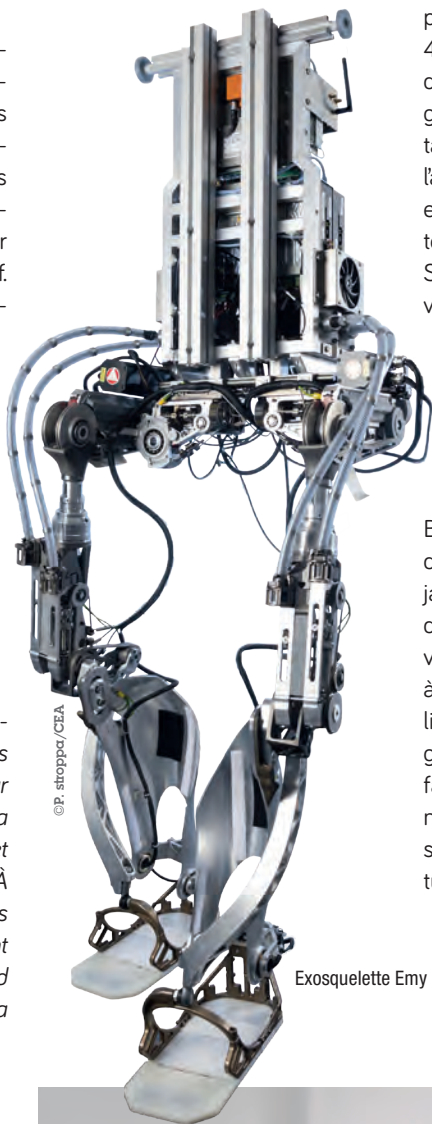
**A**ssistance au port de charge et à la mobilité : ce sont précisément ces deux solutions techniques, pour l'instant différentes, qu'explore l'équipe Robotique collaborative du CEA-List, s'appuyant sur son expertise reconnue. Après Able, dans le cadre d'un projet financé par la DGA et en collaboration avec la société RB3D et l'ESME-SUDRIA<sup>1</sup>, les roboticiens se lancent en 2009 dans la conception du premier exosquelette européen, Hercule, capable d'équilibrer des charges tout en laissant les mouvements libres. Conçu en quatre versions successives, dont l'une a été proposée à l'essai au public lors du salon InnoRobo 2014, il est constitué d'un bassin et deux jambes dotées chacune de deux actionneurs à vérins à câble<sup>2</sup>, placés au niveau des articulations du genou et de la hanche ; il est fixé à l'utilisateur au niveau du bassin et des pieds. ♦♦♦



Exosquelette Hercule V2.

### La force d'Hercule

Hercule slim est un tout nouveau prototype conçu et réalisé par le CEA-List, les moteurs sont placés dans une ceinture, dans le bassin, et transmettent leur effort aux vérins à câbles situé dans les jambes ; un plateau destiné à accueillir la charge à transporter (jusqu'à 25 kg) complète le dispositif. Ses articulations de hanche extrêmement discrètes autorisent une posture naturelle pour l'utilisateur qui peut plus facilement « oublier » son exosquelette : chaque fois que ce dernier bouge les pieds, l'exosquelette suit le mouvement et lui fait oublier la charge qu'il transporte, un peu comme si un câble le tirait vers le haut grâce à une poulie fixée au plafond ! « Toutes les millisecondes, la machine mesure les angles de ses articulations mécaniques, puis calcule grâce à un modèle mathématique prenant en compte la direction verticale, les efforts à fournir sur ces jointures pour compenser exactement le poids de sa structure, augmenté de celui de l'objet transporté, détaille Philippe Garrec. À cela s'ajoutent des capteurs d'efforts placés sous les semelles qui détectent instantanément le moment où le pied humain se soulage, ce qui garantit la bonne synchronisation du système. »



Exosquelette Emy Balance.

permettant de contrôler un exosquelette 4-membres, à partir de la mesure et du décodage de leurs activités cérébrales, grâce à l'usage d'un dispositif implantable original de mesure chronique de l'activité corticale (Wimagine®) et d'un environnement logiciel de traitement temps-réel de ces signaux.

Si les premiers Emy pouvaient être vus comme des « véhicules à pattes » simplement chargés de maintenir la posture d'un patient inerte, ceux qui suivront seront beaucoup plus sophistiqués. C'est le cas d'Emy Balance, développé dans le cadre du projet européen Balance. Cet exosquelette équipé de quatre actionneurs (sur chaque jambe) au niveau des articulations de la hanche, du genou et de la cheville, est destiné à la rééducation et à l'assistance de personnes à mobilité réduite. Il peut imposer un changement de position à un malade de façon à lui apprendre la meilleure manière de retrouver l'équilibre. Le secret ? Beaucoup d'efforts intellectuels et une formidable volonté ! ♦

Note :

3. Centre de recherche biomédicale associant le CEA, le CHU de Grenoble, l'Inserm, et l'Université Grenoble Alpes.

### EXOPUSH, PREMIER NÉ D'HERMÈS

C'est l'un des premiers « cobots » à être sorti du CEA-List, en collaboration avec la société RB3D dans le cadre du projet « Hermès » de développement des exosquelettes pour des usages industriels. ExoPush a été conçu pour réduire la pénibilité des tâches de « tirage au râteau », une technique de lissage de l'enrobé mise en œuvre lors des travaux routiers. Testé en condition réelle d'utilisation, il équipe désormais plusieurs filiales du groupe « Colas » spécialisé dans le BTP.

### La volonté d'Emy

Être éclipsé de la mémoire de l'individu placé aux commandes n'est pas le but des autres exosquelettes sur lesquels médite et travaille Catherine Bidard dans un bureau voisin. « C'est même le contraire, explique-t-elle, l'idée est de concevoir un robot d'assistance capable de suppléer, partiellement ou totalement, les fonctions déficitaires d'un patient handicapé ou en rééducation fonctionnelle. » Lancée à partir de 2012, la série des Emy (*Enhanced Mobility*) a été initialement conçue pour répondre aux besoins d'un des programmes de recherche les plus futuristes de ce début de XXI<sup>e</sup> siècle : le *Brain Computer Interface* (BCI). En cours d'essais cliniques et piloté par le professeur Alim-Louis Benabid au Centre Clinatéc<sup>3</sup> de Grenoble, il vise à redonner à des patients tétraplégiques une certaine mobilité en leur



Exosquelette membres supérieurs et inférieurs Emy.



**YANN PERROT,**

directeur du Laboratoire de robotique interactive (LRI) du CEA-List



## Des cobots « ultimes »

Yann Perrot et une partie de son équipe du LRI.

Robot, cobot, exosquelette... Yann Perrot, directeur du Laboratoire de robotique interactive du CEA, explicite ces différentes notions et les challenges technologiques qu'elles sous-tendent.

Propos recueillis par Vahé Ter Minassian

### Cobotique, Robotique collaborative : quel est le distinguo ?

**Yann Perrot :** Les deux termes désignent des branches de la robotique spécialisées dans la conception de systèmes en interaction avec l'homme. La différence tient au degré d'automatisation de ces derniers. Un robot « collaboratif » est, avant tout, un robot, c'est-à-dire une machine chargée de reproduire de façon répétitive les séquences pour lesquelles elle a été programmée. Ce qui n'est pas le cas d'un cobot qui peut être vu comme un dispositif d'assistance aux gestes,

chargé d'aider un opérateur humain à réaliser des mouvements ou des tâches en fournissant des efforts ou en soulevant un poids à sa place. En fonction de leurs caractéristiques, les exosquelettes peuvent être rangés dans l'une ou dans l'autre de ces catégories. Ceux dotés de membres inférieurs destinés à porter un patient paraplégique sont souvent des robots collaboratifs, dans la mesure où leur rôle consiste à reproduire fidèlement la séquence de pas qui leur a été enseignée. En revanche, les exosquelettes industriels sont des cobots car, qu'ils aient pour fonction de porter une charge ou d'amplifier des efforts pour faciliter la manipulation d'un outil, ils assistent les mouvements de l'opérateur sans jamais les gêner et sont perpétuellement sous son contrôle.

### Où trouve-t-on les cobots ?

**Y.P. :** Les cobots sont très utiles à l'industrie sur tous les postes où le recours à l'automatisation est trop complexe

ou trop cher, parce que nécessitant le déploiement de nombreux capteurs ou le développement de programmations trop sophistiquées. L'usage de cobots est pertinent là où l'être humain a une réelle valeur ajoutée en matière d'analyse, de flexibilité et de savoir-faire, car ces capacités sont difficiles voire impossibles à reproduire sur une machine. Ils n'ont donc pas pour finalité de remplacer l'homme mais de l'aider de façon à réduire la pénibilité de sa tâche et à optimiser sa réalisation. La cobotique recouvre plusieurs modalités d'assistance. Si cette dernière concerne un geste complexe nécessitant de la dextérité, elle cherchera à reproduire en temps réel les efforts fournis par l'opérateur en les amplifiant. Mais, s'il s'agit de porter une charge, elle aura pour but de décharger entièrement l'être humain de la tâche. Les exosquelettes peuvent être qualifiés de cobots « ultimes » dans la mesure où ils peuvent associer les deux fonctions et qu'ils sont directement portés par la personne. ◆◆◆



© P. Stroppez/CEA

Exosquelette de main Mandarin, développée par le CEA dans le cadre d'un projet de pilotage virtuel pour la formation au geste.

**Le défi en termes de recherche est double : faire en sorte que ces machines mènent à bien leur mission sans gêner les utilisateurs, et qu'elles leur apportent une réelle valeur ajoutée en termes de travail.**

Yann Perrot, directeur du Laboratoire de robotique interactive (LRI) du CEA-List

#### Et quid des exosquelettes ?

Y.P. : Avec les entreprises Colas et RB3D, nous sommes en train de démontrer l'intérêt des exosquelettes en termes industriels à travers l'exemple du « tireur au râteau ». Lors de travaux routiers, cet ouvrier spécialisé est chargé d'étaler l'enrobé dans les endroits où la machine ne peut pas passer : bordures de trottoirs, bouches d'égout. Ce travail pénible, qui nécessite un long apprentissage, est essentiel pour la bonne marche du chantier : que des vagues se forment sur le bitume et tout est à recommencer ! Le projet sur lequel nous travaillons vise ainsi à assister l'opérateur dans les efforts qu'il fournit pour tirer et pousser le râteau. Et cela marche !

#### L'objectif de la cobotique est-il de démultiplier les capacités de l'être humain ? Et si oui n'est-ce pas sans risque ?

Y.P. : Vous évoquez ici l'idée de l'homme augmenté, une piste qui n'intéresse pas le CEA car elle n'a en réalité aucun sens. En effet, un exosquelette est une machine, qui peut donc tomber en panne ; s'il est destiné à soulever une charge de 20 ou 30 kg, ce n'est alors pas un problème car l'homme peut prendre le relais. Mais que se produirait-il si le poids supporté était de 100 ou 200 kg ? Amplifier les capacités humaines est un fantasme qui relève de la science-fiction, et ce n'est en tout cas pas la direction que prennent nos recherches.

#### Quels sont les challenges technologiques ?

Y.P. : Les exosquelettes comptent probablement parmi les machines les plus complexes que l'on peut concevoir en raison de l'interaction permanente qu'ils ont avec l'être humain. Ils représentent d'importants enjeux dans les domaines de l'assistance et de la suppléance. Le défi en termes de recherche est double : faire en sorte que ces machines mènent à bien leur mission sans gêner les utilisateurs, et qu'elles leur apportent une réelle valeur ajoutée en termes de travail.

#### Quelle place occupe votre laboratoire dans le domaine de la cobotique ?

Y.P. : Le Laboratoire de robotique interactive du CEA-List a joué un rôle de précurseur dans ce domaine même s'il n'est pas l'inventeur du terme : il figure parmi les deux premiers laboratoires à s'y être consacré il y a une vingtaine d'années. Notre activité sur les exosquelettes a démarré en 2003-2004 et nous sommes aujourd'hui dans le peloton des trois ou quatre laboratoires les plus avancés au monde. ♦



Imagerie spatiale

## MegaCam ou l'archéologie galactique

Les calendriers illustrés mènent parfois à de belles découvertes scientifiques... L'histoire commence avec une image multicolore extrêmement profonde prise par l'équipe du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT), grâce à la caméra MegaCam développée au CEA-Irfu. Initialement destinée à illustrer le calendrier 2018 du CFHT<sup>1</sup>, l'image intrigue... Elle révèle des structures jusqu'ici insoupçonnées au sein du célèbre Quintette de Stephan.

Cette association de cinq galaxies située à 340 millions d'années-lumière de la Terre est étudiée par les astrophysiciens du monde entier pour comprendre l'évolution collective des galaxies. Sous l'effet de la gravitation, elles peuvent notamment se disloquer ou fusionner au gré de leurs interactions successives jusqu'à former une seule galaxie elliptique géante. Les images fournies par MegaCam révèlent pour la première fois un grand nombre de structures galactiques et extragalactiques autour du Quintette, dont certaines très étendues et de faible brillance<sup>2</sup>.

La découverte d'un halo rouge très étendu, constitué de vieilles étoiles, centré sur l'une des galaxies elliptiques, montre que le groupe de galaxies est encore en très forte interaction, et ce depuis des temps très anciens, un aspect totalement ignoré dans les études précédentes. Le Quintette de Stephan serait donc bien plus âgé qu'on ne l'imaginait... SR

Notes :

1. Chaque année, le CFHT produit le calendrier *Hawaiian Starlight* sur la base de belles images du ciel capturées par MegaCam.

2. Résultats issus d'une collaboration entre l'Observatoire astronomique de Strasbourg, l'Irfu et l'Observatoire de Lund (Suède).

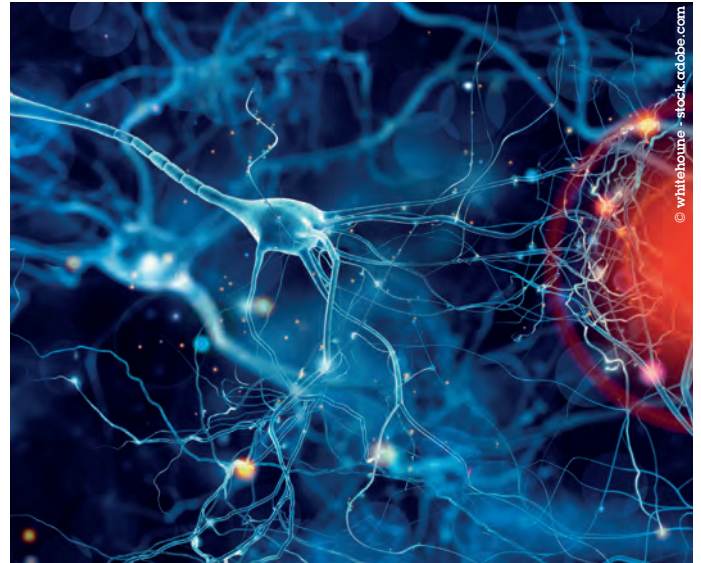


Image réalisée grâce à la caméra MegaCam sur le télescope Canada-France-Hawaï. Dans le cercle blanc, le Quintette de Stephan.

Technologies pour la santé

## Comprendre les bienfaits du proche infrarouge

La lumière proche infrarouge présente un effet protecteur sur certains neurones du cerveau. C'est la piste ambitieuse pour traiter la maladie de Parkinson que poursuit le centre Clinatéc<sup>1</sup> avec l'Université de Sydney dans le cadre du projet NRI. Pour comprendre les mécanismes mis en jeu au niveau des protéines, le projet connexe ProtéoNIR<sup>2</sup> dispose désormais d'un dispositif d'illumination de cellules en culture, couplé à une plateforme d'analyse du **protéome**.

**Protéome**

Ensemble des protéines présentes dans une cellule.

Notes :

1. CEA, Université Grenoble Alpes, Inserm, CHU de Grenoble.

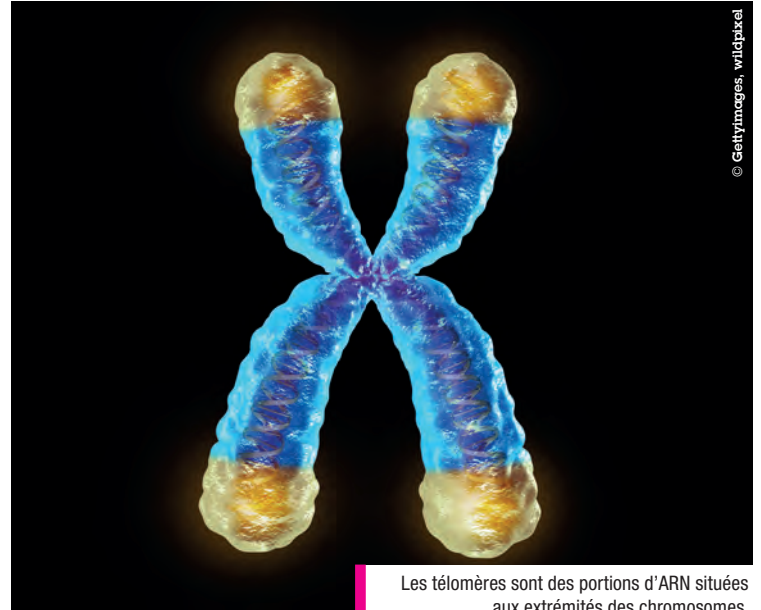
2. Financé par le Fonds de dotation Clinatéc sur l'appel à projets Edmond J. Safran 2017.

Développé par les instituts **Leti** et **Big** du CEA, cet outil permet d'identifier et quantifier les protéines dont l'expression est modifiée par l'exposition à la lumière proche IR. De quoi améliorer la compréhension du rôle que sont susceptibles de jouer ces protéines dans la protection des neurones. L'enjeu est également de découvrir des biomarqueurs de suivi d'illumination pour évaluer et accompagner au mieux le traitement des patients. AG

## Mécanisme cellulaire

Les UV de basse énergie  
abîment notre ADN

Un nouveau mécanisme d'endommagement de l'ADN est découvert. Il affecte les télomères, régions situées aux extrémités des chromosomes et impliquées dans la division cellulaire, la cancérogenèse et le vieillissement. Ces portions d'ADN peuvent être altérées par des dommages oxydatifs que l'on pensait principalement induits par des molécules issues du métabolisme ou liées à l'environnement (pollution, médicaments). Une étude, à laquelle participent les chercheurs du **CEA-Iramis**, montre que les télomères sont capables d'absorber les rayonnements ultraviolets de basse énergie (comme ceux situés dans la gamme des UVB issus du Soleil), un phénomène pouvant générer des dommages oxydatifs. L'expérience, réalisée à l'aide d'un laser UV, a mis en évidence la formation de la 8-oxo-guanine, marqueur bien connu de ce type de dommages. *SR*



Les télomères sont des portions d'ARN situées aux extrémités des chromosomes.

## Astrophysique

## Trappist-1 ou la mémoire de l'eau

La découverte en février 2017 du système exoplanétaire Trappist-1 avait fait grand bruit<sup>1</sup> ! Pour cause, certaines de ses planètes présentent un climat tempéré potentiellement capable d'abriter des océans de surface ; tout comme elles offrent des opportunités uniques de caractériser des planètes de taille et température terrestres hors du système solaire. Deux études<sup>2</sup> associant le **CEA-Irfu**, sur la composition atmosphérique des planètes et sur leur dynamique orbitale, laissent entrevoir une possible forte teneur en eau...

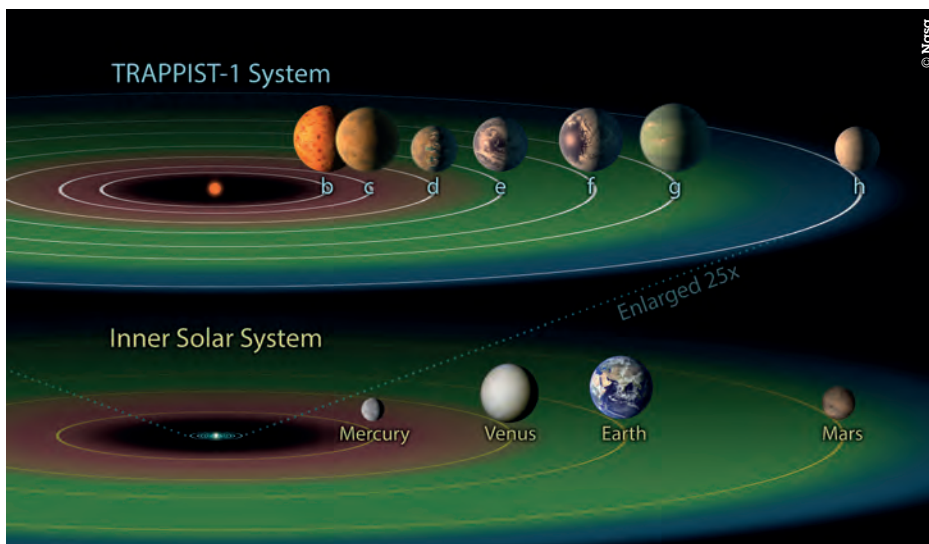
Lorsque les planètes passent devant leur étoile, la spectroscopie permet de détecter l'absorption de la lumière stellaire par les limbes d'éventuelles atmosphères. Cette méthode utilisée par le satellite Hubble démontre l'absence d'atmosphère riche en hydrogène (H<sub>2</sub>)<sup>3</sup>. Ce qui apparaît conforme aux estimations d'Emeline Bolmont de l'Irfu sur l'érosion atmosphérique : « *si les planètes ont perdu leur atmosphère originelle, elles pourraient avoir une atmosphère secondaire, de composition plus proche de celle de la Terre (faite de composés lourds), plus propice à la présence d'eau liquide en surface.* »

## Une histoire de masse et de densité

Parallèlement, des chercheurs<sup>4</sup> ont exploré la masse et la densité de ces planètes en chronométrant leurs centaines de transits devant leur étoile. En effet, la proximité des planètes entre elles est telle que l'attraction gravitationnelle perturbe la régularité de leur orbite, ce qui renseigne sur leur masse. Les données obtenues, avec des précisions de 5 à 10 % qui indiquent des densités inférieures à celle de la Terre, ont permis à l'astrophysicienne de progresser dans son étude de la dynamique orbitale de Trappist-1 : « *Grâce aux mesures d'Hubble, nous pouvons exclure des enveloppes de H<sub>2</sub> pour expliquer les masses de ces exoplanètes. Cela implique que plusieurs d'entre elles ont une teneur en eau et en composés volatils supérieure à celle de notre planète, allant jusqu'à environ 5 %.* » Ces données doivent être affinées, notamment avec des observations des transits sur des périodes plus longues. *AG*

## Notes :

1. Voir notamment *Défis du CEA* 216, pp 9-11.
2. *Nature Astronomy et Astronomy & Astrophysics*, février 2018.
3. Le seul type d'atmosphère qu'il peut détecter. En 2019, le JWST, beaucoup plus précis, prendra le relais.
4. De Witt et al.



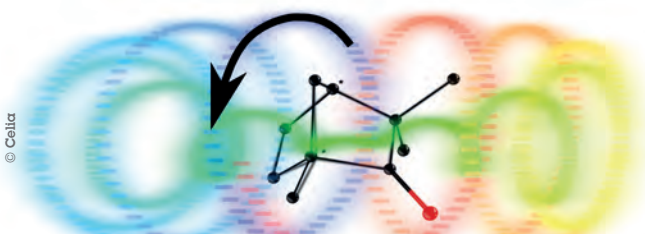
Situé à 40 années-lumière de la Terre, le système de la petite étoile rouge Trappist-1 compte au moins sept planètes, de tailles comprises entre 0,75 et 1,15 rayon terrestre, avec des révolutions de 1,5 à 19 jours (contre 365 pour la Terre).



Physico-chimie

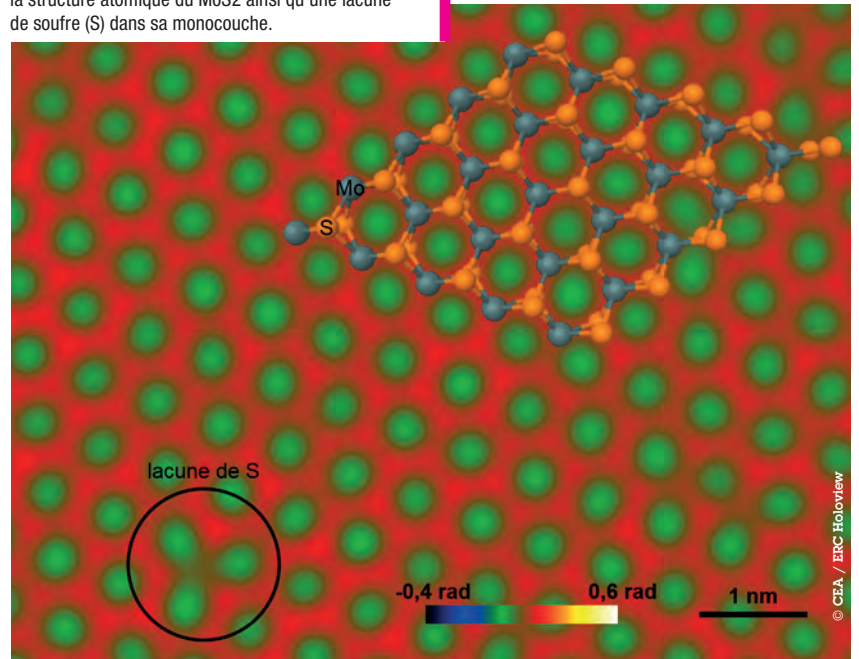
## Quand les électrons partent en vrille

Pas simple de faire entrer un pied droit dans une chaussure gauche... Pour les molécules qui forment le vivant, le même phénomène se produit. La plupart d'entre elles existent sous deux formes, dites droite ou gauche. Elles sont symétriques mais non superposables, comme une image et son reflet dans un miroir. Plus important encore, certaines réactions chimiques sont spécifiques à une seule des deux versions de la molécule. En conséquence, certains médicaments doivent leur efficacité uniquement à l'une d'entre elles, l'autre pouvant même être toxique dans certains cas. La difficulté pour les physiciens est d'arriver à les différencier. Une équipe de recherche internationale associant le Celia<sup>1</sup>, l'Iramis, l'INRS<sup>2</sup>, le synchrotron Soleil et le MBI<sup>3</sup> présente une nouvelle méthode très originale pour y parvenir. Des impulsions laser femtoseconde – ultra-brèves et polarisées circulairement – sont envoyées sur les molécules, provoquant l'excitation de leurs électrons. Ces derniers décrivent alors un mouvement circulaire dans le sens de la lumière excitatrice, tout en restant liés à la molécule. Celle-ci transforme ce mouvement circulaire en une spirale dont la direction dépend de sa forme géométrique, droite ou gauche. Une seconde étape, réalisée à l'aide d'une nouvelle impulsion laser femtoseconde, provoque l'éjection des électrons provenant de la spirale. Ils sont préférentiellement émis vers l'avant ou vers l'arrière... révélant ainsi le caractère droite ou gauche de la molécule ! SR



Représentation de la spirale décrite par les électrons, dont le sens dépend de la chiralité, droite ou gauche, de la molécule.

Image reconstruite à partir d'hologrammes montrant la structure atomique du MoS<sub>2</sub> ainsi qu'une lacune de soufre (S) dans sa monocouche.



Notes :

1. Centre lasers intenses et applications (CNRS, Université de Bordeaux, CEA).
2. Institut national de la recherche scientifique, Canada.
3. Institut Max Born, Allemagne.

Microélectronique

## L'atome à son hologramme

Les artistes et politiques n'ont plus le monopole des hologrammes ! Les atomes aussi, et même, un seul et unique atome. Dans le cadre de son projet ERC *Holoview*, David Cooper et son équipe améliorent le procédé d'**holographie** électronique qui permet de voir le potentiel d'un réseau cristallin afin de renseigner sur les propriétés d'un matériau.

Jusqu'à alors, les images étaient trop bruitées pour observer la contribution d'un atome unique. Les chercheurs ont alors modifié un microscope électronique en transmission pour capter une série d'hologrammes, et développé un logiciel additionnant ces hologrammes. « Nous avons pu visualiser le potentiel électrostatique d'un atome unique de soufre, dans une monocouche de disulfure de molybdène (MoS<sub>2</sub>), à une résolution inférieure à 1 **angström** », annonce Victor Boureau, post-doctorant au CEA-Leti.

Cette capacité à discerner la nature chimique d'un atome présente un réel intérêt en microélectronique, notamment pour optimiser la distribution de dopants dans les semi-conducteurs, ou pour détecter des défauts ponctuels liés à des excès ou manques d'atomes. AG

Holographie

Procédé d'enregistrement de la phase et de l'amplitude d'une onde diffractée par un objet afin d'en reproduire une image en « 3D ». Dans le cas présent, la 3<sup>e</sup> dimension ne correspond pas au relief d'un objet mais aux propriétés liées à l'interaction matière-onde.

Angström

Unité de longueur valant 0,1 nanomètre, soit 10<sup>-10</sup>m.



Voir les vidéos de ces projets ERC dont Holoview  
<http://bit.ly/2DJJvM>

## CEA - List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents

## Institut François Jacob - CEA

Institut de biologie François Jacob, situé à Fontenay-aux-Roses et Evry, regroupant les services IRCM, Imeti, IG et Mircen du CEA

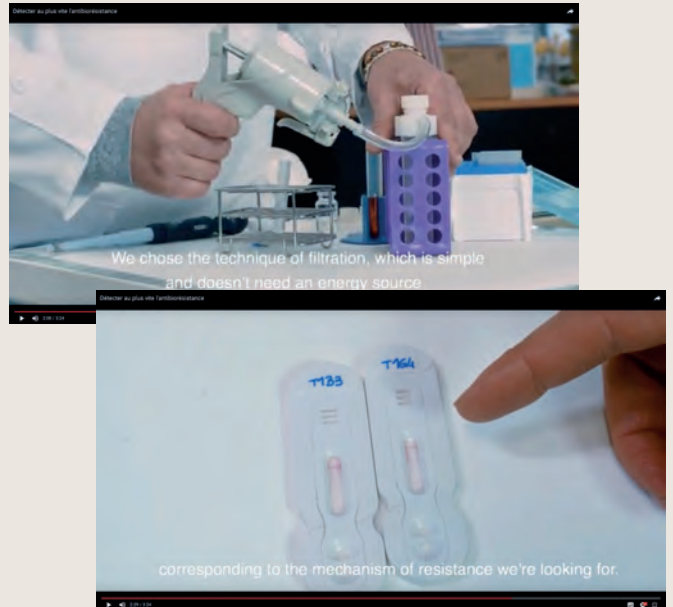
## Technologies pour la santé

## Contrôles *in situ* des produits radiopharmaceutiques

Certains produits radiopharmaceutiques utilisés pour le diagnostic ou la thérapie ont une durée de vie si courte qu'il n'est pas possible de les transporter vers un laboratoire d'étalonnage. Comment dès lors contrôler au préalable leur qualité, tel que l'impose la législation ? Un laboratoire<sup>1</sup> du CEA-List propose un dispositif de mesure primaire, directement utilisable à l'hôpital. Sa technique consiste à détecter, par des photomultiplicateurs, le rayonnement issu de la désintégration des atomes du produit radioactif. L'innovation repose sur la combinaison de trois photomultiplicateurs miniatures dans un détecteur portable. AG

## Note :

1. Laboratoire national Henri Becquerel (LNHB).



## TRAQUER LES ANTIBIORÉSISTANCES

Le CEA, en association avec une équipe de l'hôpital Bicêtre APHP-Université Paris-Sud et NG Biotech, a développé de nouveaux tests de détection de bactéries résistantes aux antibiotiques.

L'équipe travaille déjà sur un nouveau concept, plus rapide, qui permettra de délivrer un résultat en moins de 15 minutes.

Grâce à l'impression 3D, 1 500 exemplaires seront fabriqués dès cette année pour être testés dans les trois hôpitaux partenaires du projet.

À voir sur la chaîne YouTube CEA Sciences. Article à lire également en page 8.

À découvrir sur <http://bit.ly/2G9mOuv>

## Note :

1. Acide ribonucléique.

## Immunologie

## Syndrome de Sjögren : la piste des micro-ARN

Le syndrome de Sjögren est une maladie rare et auto-immune. Elle pousse les cellules de notre système immunitaire, en particulier les lymphocytes B et T, à attaquer et détruire nos propres glandes salivaires et lacrymales, entraînant des sécheresses oculaires et buccales extrêmes. Une équipe de l'Institut François Jacob a mis en évidence des dérégulations majeures de la production de micro-ARN<sup>1</sup> dans les lymphocytes B et T provenant de sang de malades. Or, ces petites molécules jouent un rôle important dans l'expression des gènes et leur traduction en protéines. Ils ont notamment étudié le rôle de l'un d'entre eux, miR-30b-5p : sa sous-représentation entraîne l'augmentation de la synthèse du facteur d'activation des lymphocytes B, et donc de la quantité de lymphocytes B. D'où l'idée d'un traitement du syndrome de Sjögren basée sur l'administration de micro-ARN dans les glandes où ceux-ci seraient sous-exprimés, de manière à diminuer l'activité des lymphocytes B. SR



## 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.**



## L'ÉPIGÉNÉTIQUE, C'EST FANTASTIQUE



L'auteur nous fait découvrir le monde fascinant de l'épigénétique, et nous fait prendre conscience que nous pouvons tous « *manager notre corps avec l'épigénétique* » pour le maintenir en meilleure santé. Nos comportements quotidiens – en matière de nutrition, d'activité physique, de gestion du stress, de plaisir et de qualité des relations sociales – orientent l'expression de nos gènes ; ils les activent ou les désactivent !

Par ailleurs, il élargit cette notion, fondée sur l'interdépendance entre individu et environnement, à la société tout entière.

*La symphonie du vivant ; comment l'épigénétique va changer votre vie, Joël de Rosnay - Éditions Les liens qui libèrent. 19 €*

## UN ROMAN BOTANIQUE



L'auteur raconte dix incroyables aventures de plantes venues d'ailleurs, comme le tabac, le kiwi, la rhubarbe ou encore l'étrange rafflésie. C'est aussi l'histoire de dix explorateurs partis au bout du monde, comme celle de Pierre Nicolas Le Chéron d'Incarville, le jésuite qui découvrit le kiwi en Chine en 1750.

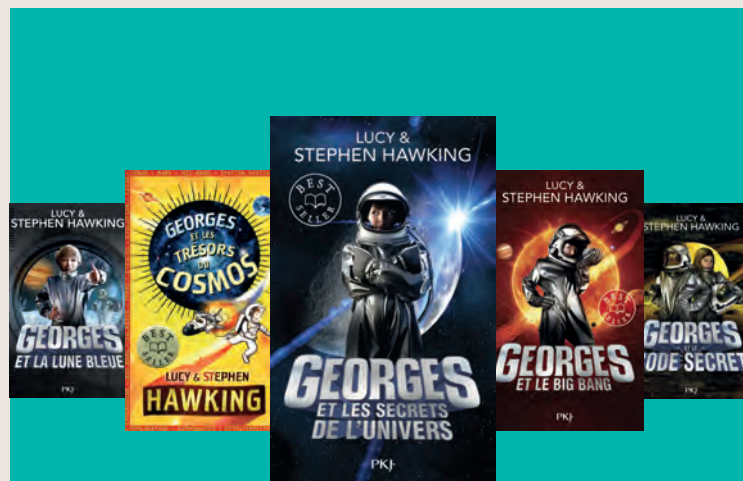
*L'Aventure extraordinaire des plantes voyageuses, Katia Astafieff - Éditions Dunod. 17,90 €*

## L'INFORMATIQUE, ÇA S'APPREND



Dans un monde où l'informatique et le numérique prennent de plus en plus de place, il devient primordial d'enseigner ce langage dès les petites classes, pour préparer les enfants aux métiers de demain, mais aussi pour leur donner les clés pour comprendre le monde numérique dans lequel ils vivent. La fondation *La main à la pâte* propose un ouvrage pédagogique, avec des séances clés en main, pour accompagner les enseignants dans l'apprentissage de cette discipline.

*1,2,3... Codez, Claire Calmet, Mathieu Hirtzig, David Wilgenbus - Éditions Le Pommier. 21 €*



### Pentalogie cosmique

## Georges, dans les pas de Hawking

Paru aux États-Unis en 1988, « *Une brève histoire du temps. Du big bang aux trous noirs* » est incontestablement le livre qui a popularisé Stephen Hawking aux quatre coins de la planète (traduit en 35 langues) avec plus de 10 millions d'exemplaires vendus. Parmi sa dizaine d'ouvrages, la pentalogie « *Georges* » écrite avec sa fille Lucy Hawking devrait poursuivre le mythe de sa personnalité, de ses découvertes et son incroyable capacité à les transmettre, auprès des plus jeunes.

Également un *best-seller*, « *Georges et les secrets de l'univers* » en est le premier tome, paru en 2007, tandis que « *Georges et la lune bleue* » restera le dernier livre publié de Stephen Hawking, en mars 2016. Ce roman d'aventures met en scène un jeune garçon confronté, en plus des turpitudes liées à son âge, aux mystères du monde qui l'entoure ; l'occasion de revenir sur les principales découvertes de Hawking. En marge du récit, les auteurs ont pris soin de réaliser des encadrés didactiques sur des notions clés, de donner à voir de somptueuses images du ciel, ou encore de proposer des articles scientifiques « *grand public* » écrits par des chercheurs renommés.

*« Georges... ». Lucy et Stephen Hawking - Éditions Pocket Jeunesse. De 7,50 à 18,50 €*

ESPACE  
INFORMATIQUE  
& SCIENCES  
DU NUMÉRIQUE

///  
Ouverture  
le 13 mars 2018

Palais  
DÉCOUVERTE

Le numérique  
envahit notre quotidien...  
Pour initier le grand public  
à cette science parfois abstraite,  
le Palais de la Découverte  
y consacre désormais  
tout un espace !

Enter



En partenariat avec :



Avec le soutien de :

