

# les défis du cea

210  
Septembre 2016

Le magazine de la recherche et de ses applications



02

## L'INTERVIEW

- ◆ Un télescope à muons pour sonder le cœur des pyramides : le point avec Sébastien Procureur ◆

04

## ACTUALITÉ

- ◆ WNE, lieu d'échanges et de rencontres pour la filière nucléaire
- ◆ Consolider les filières industrielles existantes
- ◆ I-Lab 2016 : le CEA une nouvelle fois primé
- ◆ PACA, « smart région » avec Flexgrid
- ◆ Le CEA et la MASEN lancent deux projets au Maroc ◆

06

## SUR LE VIF

- ◆ Nouveau scanner identifié
- ◆ T-REX, programmé pour détecter
- ◆ Des catalyseurs durables ! ◆

09

## LE POINT SUR

- ◆ L'apprentissage profond (« deep learning ») ◆

20

## SCIENCES EN BREF

- ◆ Filière silicium en mode additif
- ◆ Immunothérapie contre Alzheimer ?
- ◆ De la 2D à la 3D avec WiseBIM!
- ◆ Pour mieux penser « Le Penseur »
- ◆ Le HPC fait des économies d'énergie!
- ◆ Une nouvelle mission pour Tara : les récifs coralliens
- ◆ Diminuer la dose de rayons X
- ◆ Premier faisceau d'Iphi!
- ◆ De la vaccine pour comprendre la varicelle ◆

23

## KIOSQUE



12

DOSSIER

Physique des particules

## Effervescence au LHC



**SÉBASTIEN PROCUREUR,**  
physicien à l'Irfu et responsable scientifique  
sur le projet Scan Pyramids

## Dévoiler les structures inconnues de Khéops grâce à Micromegas

« Ce n'est pas parce qu'un mystère est vieux de 4500 ans qu'il ne faut pas tenter de le résoudre. »

Voici la devise de la mission Scan Pyramids à laquelle une équipe du CEA a pris part le 15 avril 2016. Enjeu : sonder le cœur des pyramides d'Égypte.

Propos recueillis par Amélie Lorec

### En quoi consiste la mission Scan Pyramids ?

Initiée, conçue et coordonnée par la Faculté des Ingénieurs de l'Université du Caire et l'Institut français HIP<sup>1</sup>, sous l'égide du ministère égyptien des Antiquités nationales, Scan Pyramids est une mission scientifique internationale dans un lieu historique d'exception ! Elle a pour objectif de scruter l'intérieur des célèbres pyramides d'Égypte. Et ainsi tenter de dévoiler de nouveaux éléments sur leur construction et leur structure interne. Quatre monuments funéraires de la IV<sup>e</sup> dynastie<sup>2</sup> sont étudiés : les pyramides rhomboïdale et rouge, ainsi que les pyramides de Khéphren et de Khéops. La grande originalité de la mission repose sur l'utilisation inédite

de techniques de pointe non destructives. Des drones sont mis en œuvre pour reconstituer, par **photogrammétrie**, les pyramides en 3D avec une précision centimétrique jamais atteinte. Des caméras de thermographie infrarouge recherchent des anomalies thermiques qui pourraient révéler des vides derrière certaines pierres. Et trois techniques de muographie, autrement dit de radiographie par les particules cosmiques appelées muons, viennent compléter l'arsenal : les émulsions chimiques et les scintillateurs des équipes japonaises, et les télescopes à muons du CEA

(voir rubrique *Tout s'explique*). Équipés de détecteurs gazeux Micromegas, ces derniers vont servir à inspecter les arêtes pour dévoiler des structures inconnues de la pyramide de Khéops. Du moins on l'espère !

### Comment le CEA a-t-il embarqué dans l'aventure ?

C'est en octobre 2015 que j'ai pris connaissance du lancement du projet. J'ai aussitôt contacté Mehdi Tayoubi, président de l'Institut HIP, pour lui exposer notre technique et monter, avec David Attié, chef du projet Scan Pyramids au

- Notes :
1. Héritage, Innovation, Préservation.
  2. De l'an - 2575 à l'an - 2465.

### Photogrammétrie

Technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesures effectuées sur des photographies montrant leurs perspectives.



CEA, un dossier dans la foulée. Dossier accepté par le ministère des Antiquités qui a annoncé officiellement notre participation à l'aventure en avril 2015. Mais l'utilisation de nos détecteurs Micromegas pour scanner des objets avait commencé bien plus tôt. Inventés au CEA en 1994 pour la physique des hautes énergies, ces instruments ont depuis beaucoup gagné en robustesse, tout en nécessitant moins d'électronique. Ils sont donc moins chers et plus facilement transportables. Ce sont ces améliorations qui ont ouvert l'utilisation de nos détecteurs à d'autres domaines que la physique fondamentale. Aussi, en 2015, avons-nous réalisé nos premiers essais de radiographie sur le château d'eau du centre CEA de Saclay. En mettant en évidence sa structure, la masse d'eau ainsi que sa variation de niveau, les résultats obtenus par notre télescope à muons ont été très probants. Et cela nous a encouragés à viser encore d'autres champs d'applications : archéologie, vulcanologie, génie civil, imagerie de réacteur...

**Pourquoi trois techniques de muographie sont-elles déployées sur le site ? Que propose celle du CEA ?**

Ces techniques apportent toutes des images 2D dans le plan perpendiculaire à la direction d'observation. Mais elles sont complémentaires dans les lieux qu'elles observent et dans leur mode de fonctionnement. Les émulsions, qui s'apparentent à la photographie argentique, sont extrêmement précises et ont une grande surface de collection. Par contre, l'obtention de résultats est lente et les plaques sont très fragiles d'où leur installation à l'intérieur de la pyramide. Les télescopes du CEA et les scintillateurs, qui correspondent plus à de la photographie numérique, travaillent en temps réel, permettant de voir l'image se former jour après jour. Les scintillateurs reposent sur une technologie ancienne qui a déjà

fait ses preuves, notamment en milieu hostile autour des volcans. Mais leur résolution est moins bonne que celle de nos télescopes. Concernant nos observations, elles sont menées depuis l'extérieur en visant les arêtes, ce qui limite la quantité de roche qui nous sépare des espaces vides recherchés dans la pyramide, et donc réduit l'absorption de muons par la matière. En contrepartie, nous sommes beaucoup plus loin des zones à sonder et recevons moins de muons « intéressants ».

**N'est-il pas difficile de mener un tel projet dans le désert égyptien, lieu insolite ?**

L'environnement autour des pyramides d'Égypte est effectivement atypique et présente des conditions climatiques contraignantes comme les fortes températures (jusqu'à 40 °C) et la poussière. Il a donc fallu s'en accommoder et s'assurer que nos trois télescopes (Alvarez, Brahic et Alhazen) allaient résister et fonctionner correctement, notamment pour la circulation du gaz. Aujourd'hui, ils sont réglés, autonomes et installés sous des tentes climatisées et surveillées. Dans les aléas rencontrés, je peux citer la tempête de sable qui a déchiré l'une d'elles. Ou encore le fait que l'une des positions précises de nos télescopes sur le site, identifiées par simulation, correspondait aux « toilettes » des chameaux, nous offrant odeurs fortes et mouches qui vont avec. Sans compter quelques difficultés d'accès au site ou d'accès aux données en raison des interruptions de connexion des clés 3G. À chaque jour sa surprise.

**À ce jour, comment progressent vos recherches ?**

Après un mois, de mi-juin à mi-juillet, nous avons pu valider le fonctionnement de notre technologie pour ce genre de mesures. Mais nous avons aussi réalisé que le modèle 3D sur lequel nous basions nos prévisions n'était pas correct



**Des améliorations ont ouvert l'utilisation de nos détecteurs à muons à d'autres domaines que ceux de la physique fondamentale.**

*Sébastien Procureur, physicien à l'Irfu*

sur l'arête nord-est de Khéops. Alors qu'il situait une chambre déjà connue derrière 3 m de matière, celle-ci serait en fait plus en profondeur, derrière 19 m. Or plus l'épaisseur de matière est grande, moins les muons passent. Il nous faut donc accumuler davantage de données pour avoir une détection significative. Un laps de temps supplémentaire qui nous impose de minimiser la consommation en gaz des instruments, car la quantité embarquée était initialement prévue pour un mois et demi.

Une fois les résultats obtenus, nous les transmettrons aux égyptologues qui se chargeront de les interpréter en considérant toutes les théories proposées, notamment sur la construction des pyramides. ♦

Salon international

## WNE, lieu d'échanges et de rencontres pour la filière nucléaire



Les professionnels de la filière du nucléaire civil se sont donné rendez-vous au salon WNE, en juin dernier à Paris-Le Bourget. Cette deuxième édition, placée sous la thématique « l'industrie nucléaire dans le mix énergétique mondial », a attiré plus de 8 800 visiteurs et 678 exposants dont 28,5 % d'étrangers. Le CEA a présenté ses activités de R&D en soutien aux futures générations de réacteurs nucléaires et à l'industrie nucléaire actuelle, son expertise en assainissement/démantèlement, ainsi que le portefeuille de formations de l'INSTN<sup>1</sup>.

Des innovations pour l'instrumentation nucléaire ont également été exposées par le List, institut de CEA Tech qui était aussi venu soutenir sa start-up Haption et ses partenaires industriels dans les domaines de la robotique et de la réalité virtuelle.

Les interactions entre industriels, institutionnels et délégations étrangères furent ainsi nombreuses, sur les stands, lors des sessions d'échanges technico-commerciaux et des tables rondes.

Celle dédiée aux innovations pour l'énergie nucléaire du XXI<sup>e</sup> siècle et animée par l'Administrateur général du CEA, Daniel Verwaerde, a notamment été l'occasion pour le Directeur de l'énergie nucléaire au CEA, François Gauché, de présenter les innovations technologiques développées dans le cadre du projet Astrid, démonstrateur de réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium.



Espace CEA au salon international du nucléaire WNE.

Note :  
1. Institut national des sciences et techniques nucléaires, administré par le CEA.

Collaboration

## Consolider les filières industrielles existantes

Le CEA et le Groupe École Centrale<sup>1</sup> (GEC) signent un accord-cadre pour unir leurs forces au service de l'innovation, de la compétitivité et de la croissance productive en France. Comment ? En créant une hybridation des modèles de développement technologique capable d'accélérer la mutation et la consolidation des filières industrielles existantes. Ensemble, les partenaires CEA Tech et GEC couvrent un grand nombre de technologies génériques parmi lesquelles les matériaux, les micro et nanotechnologies, les biotechnologies... Ils irriguent ainsi un champ applicatif complet de l'industrie et des services : énergie, ressources naturelles, informatique, télécoms...

Note :  
1. Centrale Supélec, Centrale Lyon, Centrale Lille, Centrale Nantes et Centrale Marseille.

Caméra Motion Recall présentée à Axelle Lemaire, secrétaire d'État chargée du numérique.



© CEA

### Collaboration

## Le CEA et la MASEN lancent deux projets au Maroc

Le CEA et la MASEN<sup>1</sup> collaborent dans le domaine de l'énergie solaire. Le nouvel accord de quatre ans signé à Casablanca par l'Administrateur général du CEA, Daniel Verwaerde, et le Président du directoire de la MASEN, Mustapha Bakkoury, porte sur deux projets au Maroc. L'un pour le développement d'une technologie de dessalement couplée à une source solaire. L'autre pour la création d'une plateforme dédiée à l'étude de la durabilité des centrales solaires thermodynamiques. D'autres sujets de recherche communs sont en cours d'étude : gestion des réseaux électriques, stockage d'énergie...

Note :  
1. Moroccan agency for sustainable energy.

### Concours national d'aide à la création d'entreprises

## I-Lab 2016: le CEA une nouvelle fois primé

Le dynamisme des laboratoires et des chercheurs du CEA dans l'innovation, le transfert technologique et l'entrepreneuriat est de nouveau salué. En effet, cinq projets de création d'entreprises portés par, ou avec le soutien, des chercheurs de l'organisme ont été primés lors du 18<sup>e</sup> Concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

- **EnWireS** : mise sur le marché de matériaux performants pour le stockage de l'énergie dans les batteries lithium-ion, en s'appuyant sur une technologie issue du laboratoire SYMMES au sein de l'Inac.
- **Sublimed** : proposition de solutions innovantes pour la prise en charge des douleurs chroniques de type neuropathique en exploitant une technologie développée au Liten.
- **Motion Recall** : développement d'une « caméra d'action » grand public pour la réalité virtuelle, ainsi que de salles de réalité virtuelle pour le secteur professionnel, à partir de travaux issus du List et du Léti.
- **Biometrics** : conception de solutions d'authentification biométrique et comportementale sécurisée, en s'appuyant entre autres sur des outils avancés de cryptographie homomorphe développés au List.
- **e-PiKure** : développement d'un traitement de rupture, reposant sur la stimulation de la sécrétion d'endorphines, pour la prise en charge de la douleur, à partir de travaux issus du Leti et du Service de Santé des Armées.

### Appels à projet

## PACA, « smart région » avec Flexgrid

Sélectionné dans le cadre de l'appel à projets national « Réseaux électriques intelligents », Flexgrid vise à faire de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur la première « smart région » d'Europe. Le projet est soutenu par le CEA qui apporte son savoir-faire dans le domaine des *smart-grids* sur les aspects sécurité, stockage, optimisation et autoproduction énergétique. L'organisme est par ailleurs coordinateur de l'activité « Cybersécurité » en raison de son expertise reconnue dans le domaine, notamment sous deux entités de recherche dans la Région PACA sur la sécurité des systèmes industriels et des systèmes embarqués. Présent dans le comité stratégique et opérationnel, le CEA s'efforcera aussi d'accélérer le transfert de la R&D concernée vers les opérateurs industriels. Et ce, entre autres grâce à sa plateforme d'innovation « Cité des énergies » qui a vocation à devenir un lieu vitrine pour l'accueil de délégations étrangères afin de promouvoir l'expertise française sur l'optimisation des *smart-grids*.

## Imagerie médicale

Nouveau scanner **identifié**

L'IRM à cyclage rapide de champ magnétique pourrait intervenir dans la détection précoce de certaines maladies. Deux équipes du CEA participent à son développement, fortes de leur expertise en magnétisme.

par Vahé Ter Minassian



Dans le cas de la FFC-IRM  
les champs magnétiques  
ne sont pas fixes.

“

Antoine Viana, ingénieur au Leti

**P**rocédé récemment inventé à l'université d'Aberdeen (Écosse), l'IRM à cyclage rapide de champ magnétique (FFC-IRM)<sup>1</sup> pourrait être à l'origine d'une prochaine génération de scanners hospitaliers à résonance magnétique. Moins coûteux, plus précis, offrant toutefois une moins bonne sensibilité que ceux actuellement disponibles dans les CHU, ces nouveaux équipements seraient spécialisés dans la détection précoce de certaines maladies: cancer, arthrose ou sarcopénie. Deux laboratoires du CEA, associés à des équipes de l'Inserm et du G2ELab<sup>2</sup>, participent au développement de cette technologie dans le cadre du projet européen IDentIFY. Avec un objectif : mettre leur compétence en matière de magnétisme au service de la santé !

#### Un blindage actif pour isoler le patient des perturbations magnétiques environnantes

Comme l'IRM classique, la FFC-IRM réalise des images en plongeant les patients dans des champs magnétiques. « La différence est que, dans le cas de la FFC-IRM, ces champs ne sont pas fixes mais variables au cours du temps. Lors de la phase de relaxation, leurs valeurs peuvent être choisies de très fortes à faibles, voire inférieures à celles du champ magnétique terrestre », explique Antoine Viana, ingénieur de recherche au Leti et coordinateur d'un des « work packages » d'IDentIFY. Problème : à de si basses intensités, les perturbations magnétiques environnantes ne sont plus négligeables et doivent être compensées pour permettre l'obtention d'un champ de relaxation stable et précis. D'où la nécessité de mettre au point de nouveaux blindages, plus efficaces que ceux dont sont habituellement équipés les imageurs standards.

C'est à ce travail que se consacre l'équipe du Leti. Ces chercheurs ont imaginé avec leurs collègues du G2ELab un « blindage actif », capable de mesurer les champs magnétiques ambiants d'une fréquence comprise entre 0 et 500 hertz, d'en identifier la source et de les compenser en temps réel en générant des contre-champs. Et cela même si leur intensité est de 2 micro-teslas, une valeur 25 fois inférieure à celle du champ magnétique terrestre !

« Avant d'être testé en grandeur réelle sur l'un des scanners à FFC-IRM de l'université d'Aberdeen, ce nouveau système fera l'objet d'essais à échelle réduite sur l'un des FFC-RMN<sup>3</sup> de l'Inac au CEA », indique Pascal-Henry Fries, chercheur-ingénieur à l'Inac. Ne réalisant pas d'image mais fonctionnant sur le même principe que la FFC-IRM, ce dernier appareil sera utilisé pour preuves de concept et des recherches théoriques en vue de mieux comprendre quel type d'informations supplémentaires peuvent être obtenues par cette méthode prometteuse. ♦

## Notes :

1. FFC : Fast field-cycling
2. CNRS-UGA-Grenoble INP.
3. RMN à cyclage rapide de champ magnétique.

FFC-RMN SpinMaster de la société Stellar utilisé pour les tests du CEA.

Défense et sécurité

# T-REX, programmé pour détecter

Issus du programme de recherche en sécurité globale du CEA, et développés à la demande des pouvoirs publics, les premiers prototypes du détecteur d'explosifs T-REX<sup>1</sup> sont prêts à l'emploi.

par Mathieu Grousson

## Notes :

1. Technologie de Reconnaissance d'Explosifs.
2. Programme de R&D, confié par les pouvoirs publics au CEA en 2005, destiné à la lutte contre les menaces Nucléaires, radiologiques, biologique, chimiques et explosifs (NRBC-E).

Après une démonstration de concept en 2009, un démonstrateur intégré en 2011, puis des phases de validation des performances en laboratoire et sur le terrain, le transfert industriel de T-REX a été initié vers la société Nexter-NBC Sys. Et les premiers prototypes de ce détecteur d'explosifs, développés avec l'industriel, viennent d'être livrés. Comme l'explique Didier Poullain : « le principe de T-REX est fondé sur la mesure de l'interaction physico-chimique entre les vapeurs et un matériau sensible. Conçu dans le cadre du programme interministériel de R&D NRBC-E<sup>2</sup>, il est le fruit de l'expérience de la DAM en matière de détection qui, en partenariat avec CEA Tech, a étendu le spectre des applications à la sécurité globale et aux explosifs.

### Trois technologies pour une réponse sans équivoque

T-REX innove en combinant trois technologies de capteurs chimiques de gaz, analysant en simultané les vapeurs

prélevées. Après adsorption de molécules sur la surface sensible du capteur, la première analyse consiste à mesurer la variation de masse d'une microbalance à quartz. La deuxième analyse s'intéresse aux modifications du spectre de fluorescence d'un matériau photosensible. Enfin, la troisième détecte les changements de propriétés des ondes acoustiques à la surface du matériau sensible.

« Notre valeur ajoutée tient en deux points majeurs afin que l'utilisateur final dispose d'une réponse unique sans équivoque : la conception et la synthèse des matériaux pour qu'ils soient les plus sélectifs et sensibles possibles ; et le traitement du signal issu de la fusion des données des trois mesures indépendantes » explique le spécialiste. T-REX est ainsi capable de détecter une très large palette d'explosifs ou bien de composés précurseurs, avec un pouvoir de résolution unique d'une molécule par milliard !

Didier Poullain ajoute : « Par ailleurs, nous avons développé un module additionnel pour la détection de certains composés dont la pression de vapeur est trop faible pour être détectés sans contact et nécessitant, de fait, un frotti. Cela fait de T-REX un détecteur évolutif. » En cours de validation dans les locaux du CEA, les cinq prototypes conçus par Nexter-NBC Sys seront bientôt évalués par des laboratoires indépendants, et testés par différents utilisateurs potentiels. Objectif : un retour d'expérience permettant une commercialisation courant 2017. De quoi contribuer à contenir autant que possible la menace terroriste. ♦



Chimie verte

# Des catalyseurs durables!

Gain de temps, d'argent, et moins d'impact sur l'environnement. N'en jetez plus, les catalyseurs réutilisables de l'Ibitec-s ont tout pour eux, et le procédé qui a permis de les développer est unique.

par Amélie Lorec

**L**a chimie durable, ou chimie verte, est la chimie du XXI<sup>e</sup> siècle en ce qu'elle a pour vocation de limiter l'impact des procédés chimiques sur l'environnement. De nombreux efforts sont donc entrepris dans ce sens, comme l'illustrent les travaux réalisés par une équipe de l'Ibitec-s qui a développé des catalyseurs réutilisables dans le cadre d'un projet franco-indien<sup>1</sup>.

Note:

1. Financé par CEFIPRA (centre Franco-Indien pour la promotion de la recherche avancée).

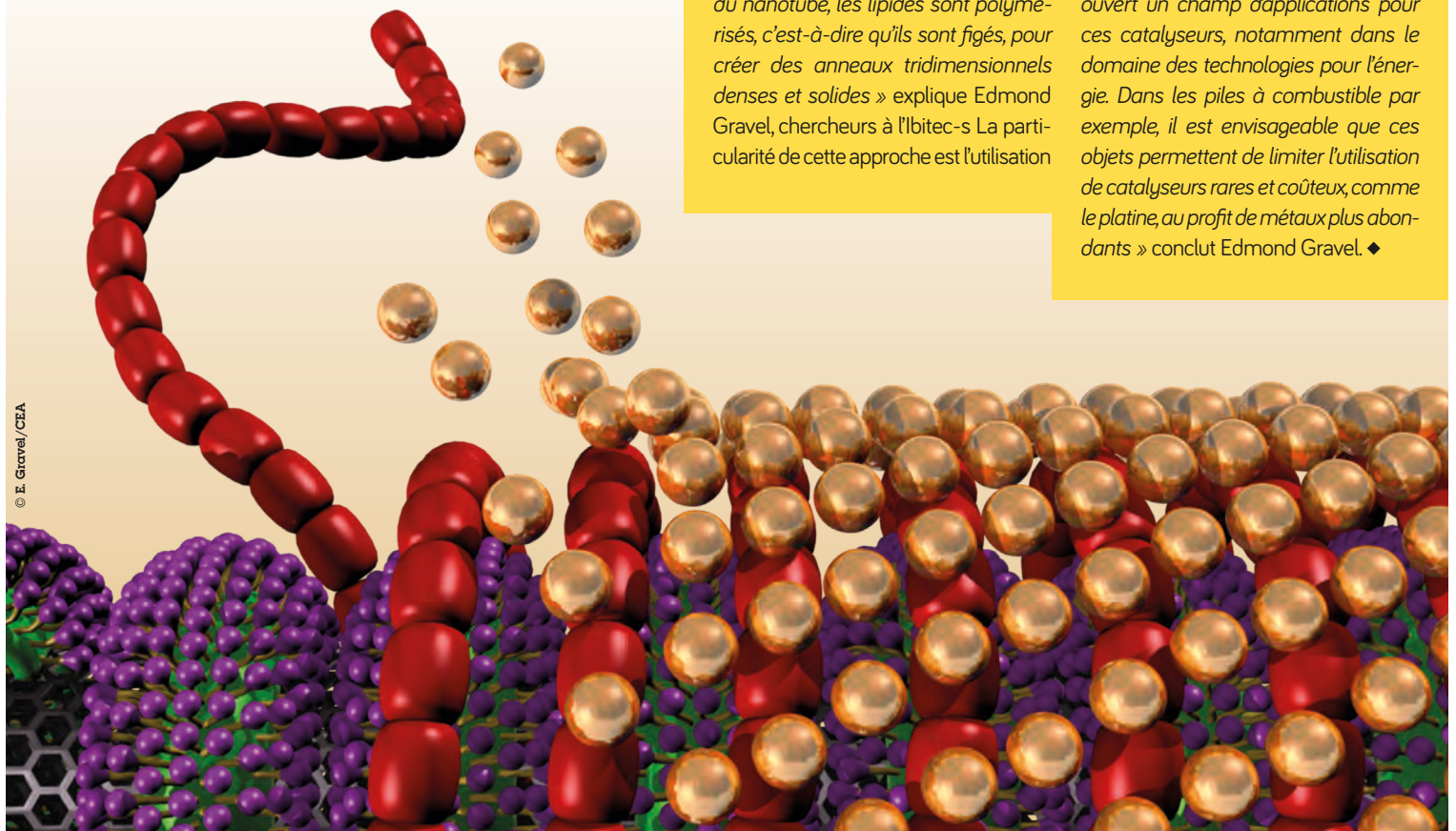
Petit rappel : les catalyseurs sont des composés qui accélèrent la vitesse d'une réaction chimique à l'issue de laquelle ils reviennent à leur forme initiale. Incontournables dans tout ce qui est chimie industrielle, ils présentent cependant quelques inconvénients : leur rareté pour certains, leur traitement en tant que déchets pour d'autres ou encore les conditions opératoires très énergivores qu'ils requièrent pour être plus efficaces. Un système catalytique idéal verrait donc ces points améliorés, tel que le proposent les catalyseurs réutilisables de l'Ibitec-s !

### Un procédé additif et non destructif

« Nous avons mis au point un procédé d'ancrage de lipides chargés négativement autour de nanotubes de carbone. Une fois organisés à la surface du nanotube, les lipides sont polymérisés, c'est-à-dire qu'ils sont figés, pour créer des anneaux tridimensionnels denses et solides » explique Edmond Gravel, chercheurs à l'Ibitec-s. La particularité de cette approche est l'utilisation

d'un procédé additif, et non pas destructif comme c'est habituellement le cas. Il permet de modifier la surface du nanotube sans en altérer les propriétés électroniques. La couche de lipides constitue un point d'accroche pour un second polymère pouvant accueillir et stabiliser des particules métalliques qui servent de catalyseurs : or, argent, cuivre, nickel, ruthénium... Intérêt de la manœuvre ? À l'issue de la réaction chimique, le catalyseur peut être récupéré par des techniques simples de filtration ou centrifugation, puis réutilisé. Ceci offre un gain de temps et d'argent, tout en limitant la production de déchets et en diminuant les quantités de solvants organiques utilisés.

« Nos résultats sur les nanotubes ont ouvert un champ d'applications pour ces catalyseurs, notamment dans le domaine des technologies pour l'énergie. Dans les piles à combustible par exemple, il est envisageable que ces objets permettent de limiter l'utilisation de catalyseurs rares et coûteux, comme le platine, au profit de métaux plus abondants » conclut Edmond Gravel. ♦

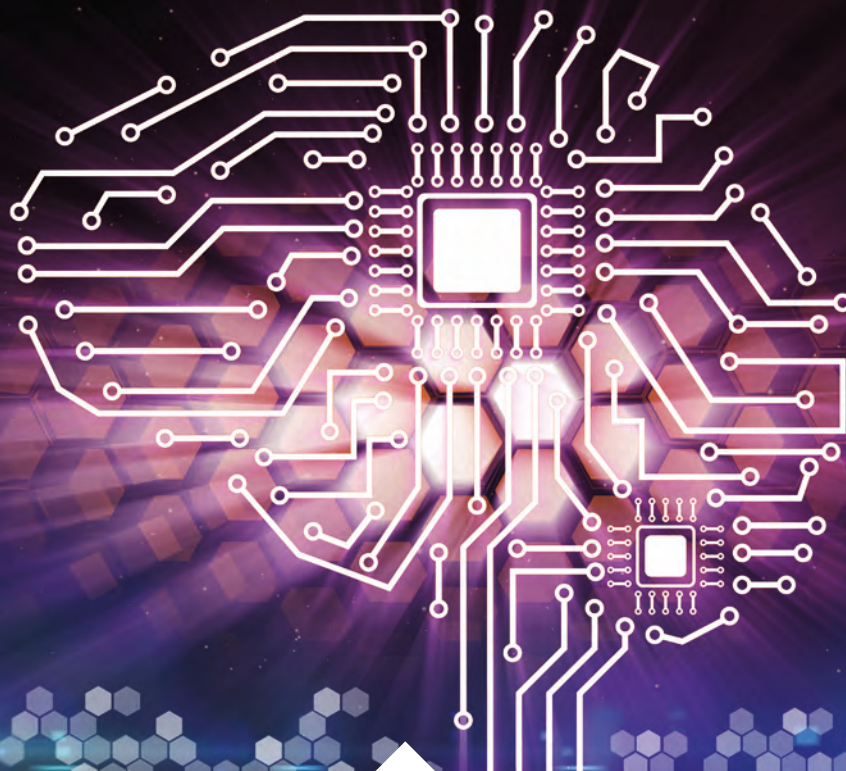


© E. Gravel/CEA



Avec des logiciels capables d'apprendre et dont le fonctionnement mime celui du cerveau humain, « l'apprentissage profond » révolutionne le domaine de l'intelligence artificielle. Dans les coulisses, de nombreux ingénieurs et informaticiens, comprenant ceux du List, institut de CEA Tech, sont aux commandes.

par Mathieu Grousson



# L'apprentissage profond (« *deep learning* »)

**U**n ordinateur capable de battre un champion de jeu de go<sup>1</sup> ; un autre qui apprend à composer de la musique ou qui révèle ce qui s'apparenterait aux rêves psychédéliques formés dans les tréfonds de sa mémoire numérique... Ces dernières années, l'intelligence artificielle est entrée dans une nouvelle ère, grâce à la révolution du « *deep learning* », ou apprentissage profond, née des progrès algorithmiques et de l'augmentation de la puissance des calculateurs à l'heure du *big data*. Sur cette déferlante, le List, institut de CEA Tech, est aux avant-postes des applications d'aujourd'hui, et prépare déjà la prochaine étape qui verra peut-être l'avènement de véritables cerveaux en silicium.

## Une solution logicielle d'apprentissage profond...

Le *deep learning* est une méthode d'apprentissage qui permet à un programme informatique de reconnaître un visage ou le contenu d'une image, de comprendre un langage... Un ordinateur qui apprend ? L'idée n'est pas nouvelle sauf

qu'avant, l'opération s'effectuait à la main quand désormais la machine apprend toute seule. Plus précisément, la majorité des applications utilisent de l'apprentissage dit supervisé. Concrètement, pour qu'un programme reconnaisse un chat, on commence par le nourrir avec des milliers d'images de chats étiquetées comme telles. Une fois entraîné, il est alors capable de reconnaître le félin domestique sur une nouvelle image.

La particularité réside dans l'architecture du programme qui modélise des réseaux de neurones : c'est-à-dire un ensemble virtuel de milliers d'unités (les neurones) effectuant de petits calculs simples, le tout organisé en couches successives, de telle sorte que le résultat de la première couche nourrit la deuxième et ainsi de suite. Dans le cas du chat, la première couche, par exemple, compare la différence des pixels au-dessus et au-dessous des oreilles, la deuxième identifie des lignes, puis la troisième reconnaît les angles caractéristiques des pointes ; chaque étape forge ainsi des concepts de plus en plus généraux et abstraits, alors que les méthodes traditionnelles se contentent de comparer les pixels. ◆◆◆

**Note:**  
1. Ayant appris à jouer au jeu de go par « *reinforcement learning* » (réapprentissage par renforcement), le programme alphaGo de Google a battu le champion européen en octobre 2015 et le champion du monde en mars 2016.



Homme Vs ordinateur au jeu de Go.

**...basée sur une architecture en réseaux de neurones...**

Modélisés formellement à partir de 1943, et après de premières utilisations dans les années 1990, les réseaux de neurones ne prennent leur envol qu'au début des années 2010. Geoffrey Hinton et son équipe, à l'Université de Toronto, montrent alors que certaines difficultés mathématiques associées aux réseaux de neurones disparaissent au-delà d'une certaine taille. Or, justement, des ordinateurs de plus en plus puissants, en même temps que l'ère du *big data*, se profilent à l'horizon. Résultat : en 2012, les techniques de *deep learning* commencent à tenir la dragée haute à leurs concurrentes pour la reconnaissance d'image, comme les approches « SVM<sup>2</sup> ». Désormais, la compétition se joue entre les différentes méthodes d'apprentissage profond. « *Le deep learning est aujourd'hui incontournable dans des situations où des données variées sont disponibles en grande quantité pour la phase d'apprentissage* », analyse Anthony Larue du List.

Note :  
2. Support Vector Machine.

**...adaptée à de nombreux usages...**

Cette révolution du *deep learning*, les scientifiques du CEA y ont participé dès le début. En témoignent entre autres les travaux du laboratoire dirigé par Anthony Larue qui, entre 2006 et 2011 et en collaboration avec la Direction des applications militaires du CEA, a exploité le potentiel du *deep learning* pour l'analyse des signaux sismiques. « *L'apprentissage profond, et notamment les réseaux de neurones convolutionnels, était parfaitement adapté aux bases de données volumineuses référencées depuis plusieurs années par les 40 stations sismiques présentes sur le territoire* », explique le chercheur. Résultat : la possibilité de passer d'une analyse effectuée par des opérateurs humains en se fondant sur des recoupements complexes des signaux provenant de plusieurs stations, à un traitement automatique à partir de données locales. De quoi permettre aux analystes de se concentrer sur les cas difficiles. Actuellement, l'équipe d'Anthony Larue développe, avec la société Invensense, un projet pour reconnaître l'environnement dans lequel se trouve une personne (transport, restaurant, bureau, centre commercial, rue...) à partir des signaux audio qui l'entourent. « *En analysant à la fois le bruit de fond*

**Réseau convolutionnel**

Avec une architecture dédiée au traitement de l'image.

et un ensemble de bruits spécifiques, le logiciel construit petit à petit des représentations de chaque environnement, détaille le scientifique. Grâce au *deep learning*, l'algorithme peut non seulement faire évoluer son modèle par l'ajout de nouvelles données et aussi l'adapter à chaque utilisateur. » Cette information est ensuite exploitée par des applications smartphone pour lui faire des propositions adéquates (informations sur le transport utilisé...). En 2015, les chercheurs ont pu montrer que le *deep learning* permettait un gain de performance de 5 % sur des méthodes de l'état de l'art comme les SVM.

**Grâce au Deep Learning, l'algorithme peut faire évoluer son modèle et l'adapter à chaque utilisateur.**

Anthony Larue, ingénieur au List

**...que le CEA configure pour ses partenaires industriels...**

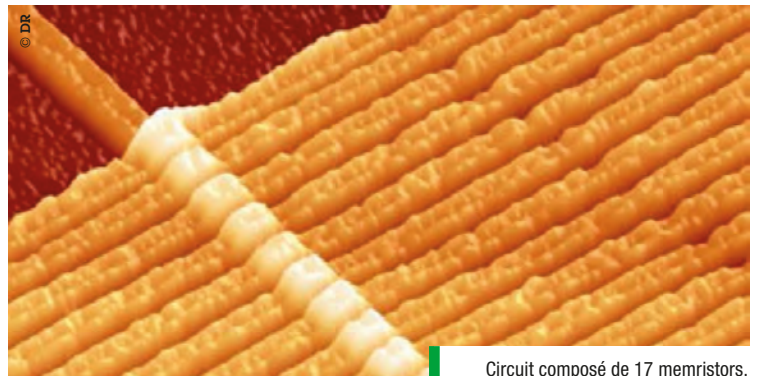
Par ailleurs, l'équipe Multimédia du List, emmenée par Bertrand Delezoide, s'est taillé une réputation en s'attaquant à un des aspects les plus importants du *deep learning*, soit l'optimisation de la phase d'apprentissage. Comme il le résume, « *il faut beaucoup de données pour qu'une machine apprenne à reconnaître quelque chose sur une image, mais il faut également que ces données soient facilement récupérables* ». Aussi, les spécialistes ont-ils développé un procédé permettant d'identifier les concepts importants à l'aide de requêtes sur des moteurs de recherche indexant les images par du texte. Le spécialiste explique : « *si l'on veut que la machine apprenne à reconnaître un sphinx, on lance cette requête sur un moteur de recherche et on prend les 1 000 premières occurrences. À partir de ces images, la machine ajoute au réseau un neurone entraîné à identifier le nouveau concept. D'un mot, elle apprend toute seule!* »

Particulièrement efficace et nécessitant peu de moyens, le procédé est à l'origine de la création de la start-up KNIMA, essaimée du CEA et primée au 17<sup>e</sup> Concours national à la

création d'entreprise de technologies innovantes (i-LAB 2015). Objectif : la commercialisation d'outils de *deep learning* à destination des secteurs du marketing et du tourisme. Autre point fort du List, l'optimisation des réseaux de neurones pour des situations où les capacités de calcul et/ou les ressources énergétiques sont limitées, typiquement pour des applications embarquées. Pour ce faire, une autre équipe du List a mis au point la plate-forme N2-D2 issue des travaux d'Olivier Bichler, laquelle automatise le développement d'applications à base de réseaux de neurones. Celle-ci a par exemple été mise à profit récemment dans le cadre d'une collaboration industrielle. Objectif : développer des réseaux de neurones pour la détection en temps réel de défauts de surface à partir d'images vidéo issues des laminaires, machines pour réduire l'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). « La plate-forme nous a permis de tester différentes configurations sur différents supports d'exécution afin de trouver le meilleur compromis performances/vitesse », explique le scientifique.

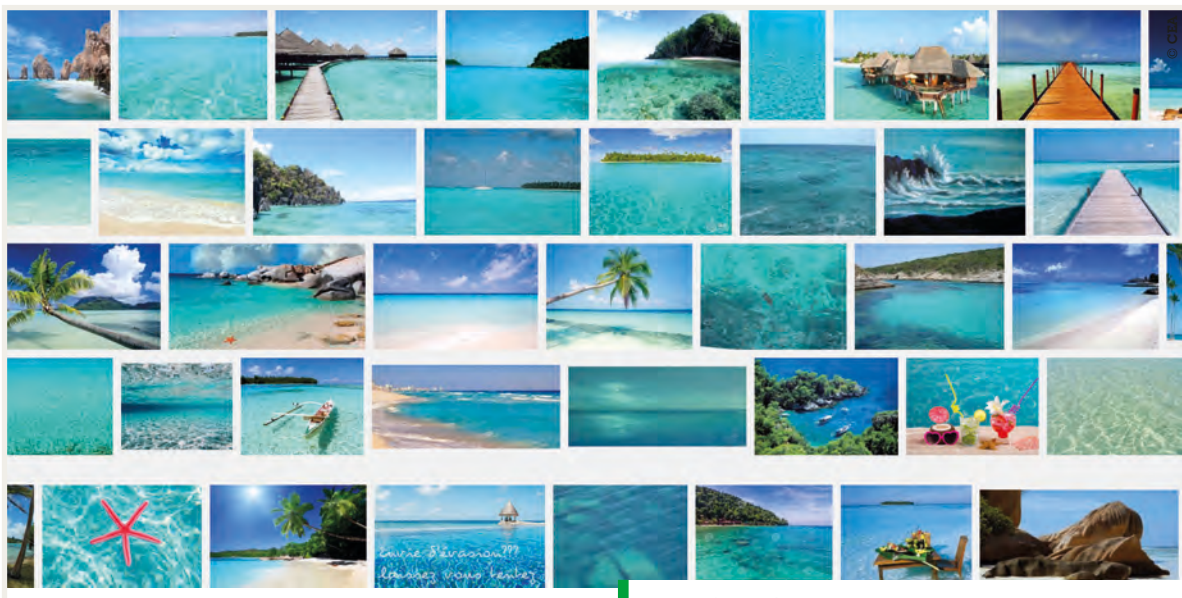
**...tout en poursuivant les innovations.**

Ainsi, le CEA se distingue par une double attention portée d'un côté aux logiciels (les réseaux de neurones) ; de l'autre aux circuits permettant de les mettre en œuvre. À cet égard, le List et la start-up GlobalSensing Technologies (GST) ont récemment proposé une nouvelle architecture générique massivement parallèle pour les calculs des réseaux de neurones et à très faible consommation. Un prototype s'est distingué par un gain énergétique de 5 à 6 lors de la mise en œuvre d'un réseau de neurones par rapport au cas où ce dernier était exécuté sur un processeur standard. Sans compter une capacité à traiter 5 000 images par seconde quand un processeur classique plafonne à 800. « Nous sommes en train de décliner cette architecture novatrice sur un circuit dédié, avec pour objectif un gain supplémentaire de 50 », précise Marc Duranton.

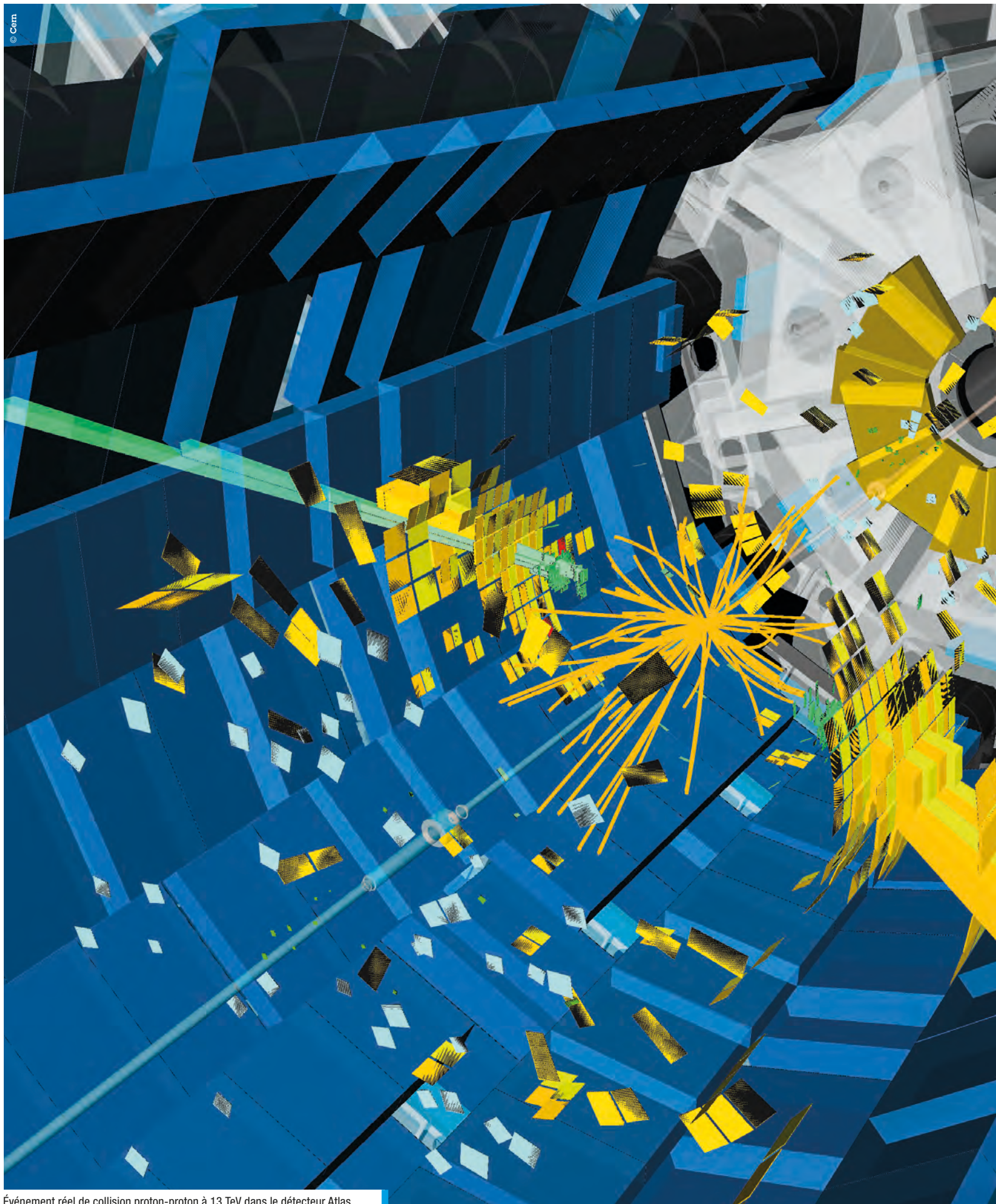


Circuit composé de 17 memristors.

À plus long terme, l'équipe travaille également au développement de réseaux de neurones capables d'apprendre de façon non supervisée. Ainsi, pour qu'une machine apprenne à reconnaître un chat, il ne sera même plus la peine de lui préciser que telle ou telle image en contient un. Il suffira de lui fournir des données en nombre suffisant d'où elle fera émerger ses propres catégories. Pour ce faire, une des pistes envisagée est d'aller au-delà de logiciels mimant le fonctionnement du cerveau, en imaginant des processeurs dont la circuiterie même serait à l'image d'un réseau de neurones. Concrètement les spécialistes fondent en particulier leurs espoirs sur un composant appelé memristor. Initialement élaboré en 2008 par des chercheurs des laboratoires Hewlett-Packard, il s'agit d'une minuscule résistance électrique variable à effet de mémoire, capable de mimer le fonctionnement des synapses (les connexions entre les neurones). « On pourra ainsi construire des réseaux hyperdenses contenant plusieurs milliards de synapses par centimètre/carré. Et même plus si on les superpose pour créer des structures tridimensionnelles! », prédit le scientifique. Un ordinateur gagnant au go ou apprenant tout seul le concept de chat n'aura alors plus rien d'une performance extraordinaire. ♦



Requête lancée pour la reconnaissance d'une image par l'ordinateur.



Événement réel de collision proton-proton à 13 TeV dans le détecteur Atlas.

Physique  
des particules

# Effervescence au LHC

P.14

Le retour en force  
du LHC

P.16

La « bosse »,  
grandeur  
et décroissance

P.18

Vers la « nouvelle  
physique »

Les statistiques ont parlé et le verdict est tombé : l'excès d'événements apparu dans les données recueillies en 2015 par les équipes du LHC au Cern n'est pas la signature d'une nouvelle particule. Mais l'aventure ne fait que commencer, grâce aux performances atteintes par la version remaniée de la machine, désormais capable d'opérer des collisions à 13 TeV.

Ce domaine énergétique permettra d'affiner la carte d'identité du fameux boson de Higgs, et de détecter une plus grande quantité de phénomènes rares. De quoi repousser les frontières de la physique au-delà du Modèle standard.

par Alice Mounissamy et Aude Ganier

# Le retour en force du LHC

Le LHC signe son grand retour dans sa version 2 et remplit sa mission : atteindre une très haute intensité à une énergie de collisions de 13 TeV. Une gageure scientifique et technologique, accompagnée de nombreux résultats...

## Modèle standard de la physique des particules

Cadre théorique décrivant les particules élémentaires de la matière ainsi que leurs interactions.

## Électronvolt (eV)

Unité de mesure utilisée pour quantifier l'énergie d'une particule ; correspondant également à la masse, du fait de l'équivalence énergie-masse ( $E=mc^2$ ).  
1 Tera (T) = mille milliards

**I**l y avait foule à la traditionnelle conférence d'été internationale de la physique des particules, ICHEP<sup>1</sup>, dont la 38<sup>e</sup> édition s'est tenue du 3 au 10 août dernier à Chicago. Pour cause, beaucoup attendaient l'annonce, qui n'allait pas venir, de la découverte d'une nouvelle particule (voir article suivant). Déceptions ? Finalement très peu, tant le grand collisionneur de hadrons LHC du Cern avait une belle moisson de résultats à présenter. À commencer par le nombre record de données accumulées en

2016 en un laps de temps très court ; signe de la remarquable performance de la machine dans sa version remaniée depuis 2013 et signe de l'excellence de toute une communauté d'expérimentateurs, théoriciens, ingénieurs et techniciens, dont plus de 400 personnes du CEA et du CNRS.

## Cure de jouvence

C'était juste après la découverte du boson de Higgs, la particule manquante du **Modèle standard de la physique des particules** prédite par des théoriciens cinquante ans auparavant. Le LHC opérait alors dans une phase à 8 TeV d'énergie de collision des protons qui lui avait permis de débusquer en 2012 le « Higgs » à une masse de 125 GeV. Car dans le monde des particules élémentaires, les secrets de l'édifice de la matière se cachent à des dimensions inférieures à un cent milliardième de la

taille d'un cheveu. Et pour fréquenter les phénomènes physiques à cette échelle, les physiciens du LHC étudient des collisions de protons à très haute énergie. « Conformément à la fameuse formule d'Einstein  $E = mc^2$ , l'énergie disponible au moment de la collision de deux protons sert à créer de nouvelles particules. L'étude détaillée de ces produits de collisions permet ensuite de valider ou d'infirmer certaines théories » explique Nathalie Besson, physicienne des particules à l'institut Irfu du CEA.

Dès 2013 donc, des centaines d'ingénieurs et de techniciens du Cern ont passé deux années à consolider l'accélérateur le plus grand et puissant au monde et à en optimiser les détecteurs. Enjeu : fournir deux faisceaux de protons d'une énergie jusqu'alors inégalée de 6,5 TeV circulant en sens opposé pour mieux se percuter à une énergie totale de 13 TeV. Pour cela : certains

Salle d'acquisition de l'expérience Atlas.



## Le processus d'une découverte en physique des particules



### 1. De nouvelles idées

Le Modèle standard, cadre théorique de la physique des particules n'expliquant pas certains mystères (matière noire, masse du boson de Higgs...), les physiciens formulent de nouvelles théories allant jusqu'à prédire l'existence de nouvelles particules massives.

### 2. Simuler pour réaliser des prototypes

La production de particules résulte de la collision d'autres particules, dans de très grands instruments : les collisionneurs. Pour les concevoir, ainsi que les détecteurs, les physiciens simulent un très grand nombre de collisions de particules.

aimants (18 sur les 1 232 dipôles supra-conducteurs) ont été remplacés ; plus de 10 000 jonctions électriques ont été renforcées ; le système cryogénique a été entièrement consolidé, etc. Quant aux faisceaux de protons, ils sont désormais focalisés plus étroitement (taille d'un cheveu) pour provoquer davantage d'interactions proton-proton à chaque croisement des faisceaux (20 à 30 en moyenne). Faisceaux dont les paquets de protons, certes moins denses (chacun contenant  $1,2 \times 10^{11}$  protons contre  $1,7 \times 10^{11}$  en 2012), circulent à des intervalles beaucoup plus brefs (25 nanosecondes entre chaque paquet contre 50 dans la version précédente).

### Le temps des redémarrages et des imprévus

Le 5 avril 2015, la nouvelle période d'exploitation du LHC, appelée Run2<sup>2</sup>, commençait. L'objectif des 13 TeV était rapidement atteint. Même si le LHC fonctionnait prudemment à intensité limitée en 2015, permettant aux expériences Atlas et CMS (qui sont 2 des 4 détecteurs placés en des points de collisions le long de l'accélérateur) de fournir l'équivalent d'environ 400 mille milliards ( $10^{12}$ ) de collisions proton-proton, soit 4 **femtobarns inverses** ( $\text{fb}^{-1}$ ) de données.

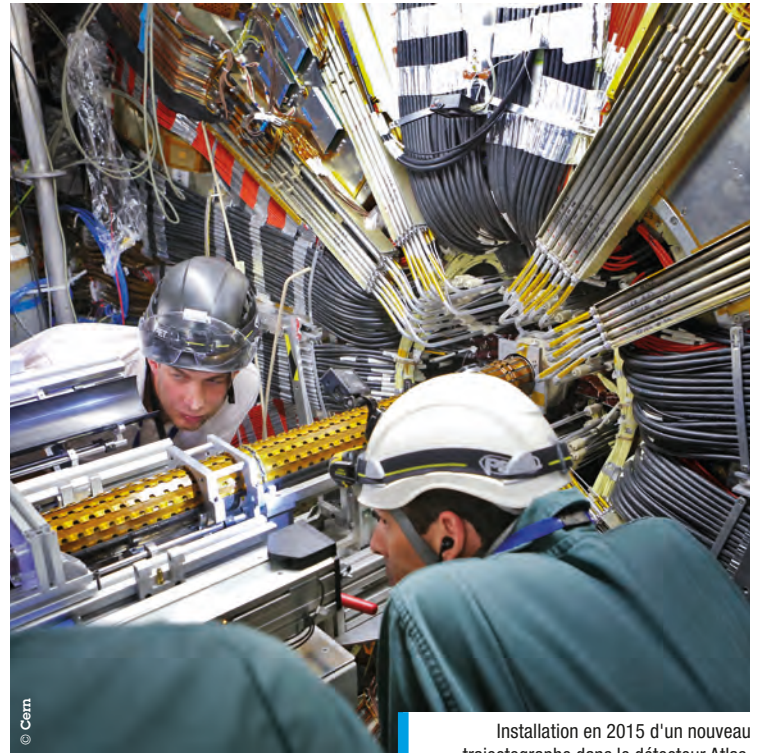
Après la trêve hivernale, le LHC a redémarré en 2016 mais sa montée en puissance a vite été interrompue par la visite surprise d'une fouine, au petit matin du 29 avril. Dans la partie supérieure d'un grand transformateur électrique extérieur au Cern, le petit animal provoquait un court-circuit endommageant les connexions haute tension du transformateur ! Tout a fini par rentrer dans l'ordre. Et le moins que l'on puisse dire

c'est que les résultats présentés à la conférence ICHEP en ce début de mois d'août attestent du défi qu'ont relevé les ingénieurs et les physiciens pour mettre en œuvre et exploiter le LHC à 13 TeV. « En effet, pour appréhender les phénomènes physiques de l'infiniment petit, il faut pouvoir les détecter proportionnellement à trois paramètres: la probabilité qu'ils ont de se manifester (laquelle augmente avec l'énergie des collisions), le nombre de fois où l'on provoque les collisions de protons capables de les provoquer et l'efficacité de détecter les particules issues de ces collisions » explique Gautier Hamel de Monchenault, physicien à l'Irfu.

### Des prestations exceptionnelles

Et le LHC Run2 favorise précisément les scénarios recherchés par les physiciens. Même si la plupart des phénomènes d'intérêt sont très rares et ne peuvent se produire que moins d'une fois par milliard de collisions. Il n'empêche, les opérateurs du LHC ont franchi le cap du milliard de collisions par seconde au pic d'intensité, et les expériences ont déjà enregistré 5 fois plus de données (accumulation d'environ  $20 \text{ fb}^{-1}$ ) en 2016 qu'en 2015, en seulement quelques semaines d'exploitation à haute intensité.

Des mesures plus précises des processus du Modèle standard et des recherches plus sensibles de la production directe de nouvelles particules aux énergies les plus élevées sont désormais possibles. Par exemple, le boson de Higgs découvert en 2012 a également été détecté à la nouvelle énergie de 13 TeV, avec une signification statistique plus élevée. Autant de données



Installation en 2015 d'un nouveau trajectographe dans le détecteur Atlas.

qui vont permettre de compléter sa carte d'identité en mesurant de nouveaux modes de désintégration et en précisant ses couplages aux autres particules élémentaires. D'autres résultats, liés à la découverte d'un mode de désintégration inconnu du méson  $B^0$ , doivent permettre de progresser dans la compréhension du phénomène de la « violation de la symétrie » qui lie la matière et l'antimatière... Quant aux signes de la production de nouvelles particules prédites par des théories de la nouvelle physique (au-delà du Modèle standard), aucun indice convaincant n'a pour l'heure été observé. « Nous ne sommes qu'au début de l'aventure ! » s'est exclamée Fabiola Gianotti, directrice générale du Cern. ♦

### femtobarns inverses ( $\text{fb}^{-1}$ )

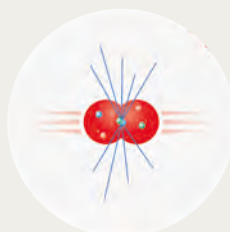
Unité de mesure du nombre cumulé de collisions de protons. À 13 TeV,  $1 \text{ fb}^{-1}$  correspond environ à 100 mille milliards de collisions de protons.

#### Notes

1. International Conference on High Energy Physics.
2. Le Run2 se terminera en 2018.

### 3. Construction des instruments

Par exemple, la construction du LHC, décidée en 1984, s'est achevée en 2008 tandis que des milliers de physiciens collaboraient pour réaliser ses quatre détecteurs : Atlas, CMS, LHCb et Alice, placés en 4 points de collision des deux faisceaux de protons circulant en sens opposés.



### 4. Collisions

La production d'une particule très massive est un événement rare, moins d'une fois par dix milliards de collisions pour le boson de Higgs par exemple. Le LHC a été conçu pour produire plus d'un milliard de collisions par seconde.

# La « bosse », grandeur et décroissance

En toute rigueur, les physiciens ne pouvaient pas annoncer avoir découvert une nouvelle particule. Certes, une « bosse » se dessinait sur leurs graphiques, mais il fallait poursuivre l'accumulation de données pour confirmer une certitude statistique...

## excès

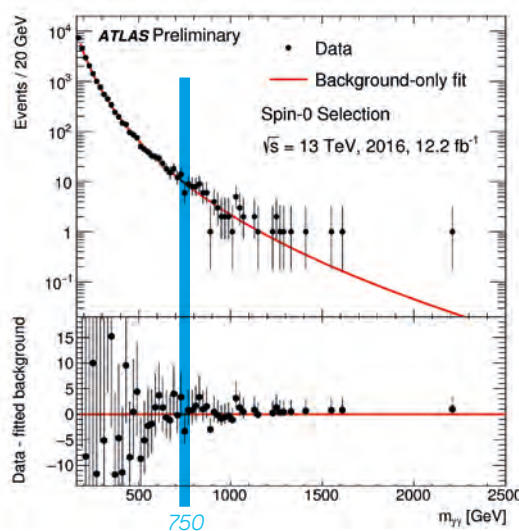
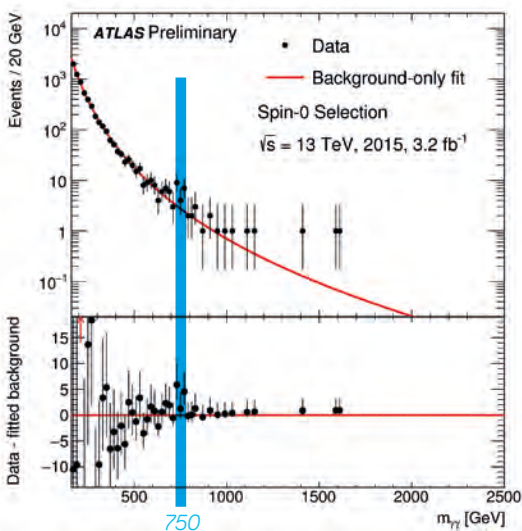
Nombre anormalement élevé d'événements par rapport au bruit de fond estimé par simulation à partir des processus physiques connus.

**C**e 5 août 2016, les statistiques l'ont condamné : l'excès de paires de photons observées à une masse de 750 GeV par les détecteurs Atlas et CMS du LHC n'est pas le signe d'une nouvelle particule. Ce rebond, apparu dans l'analyse des données recueillies en 2015, a intensément fasciné physiciens et journalistes, tandis que les expérimentateurs attendaient rigoureusement la preuve par « 5 sigmas ».

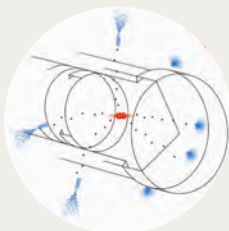
## De la rumeur à la rigueur

L'excès observé indépendamment dans les deux détecteurs Atlas et CMS avait été annoncé fin 2015, après la collecte de 2 (pour CMS) à 4 fb<sup>-1</sup> de données (pour Atlas) à la nouvelle énergie de collision du LHC de 13 TeV. La coïncidence prenait alors la saveur d'une promesse tenue. La promesse de l'apparition des premières particules non prédites par le Modèle standard. Bien que désormais complète avec la

découverte du boson de Higgs, cette théorie actuelle de la physique doit en effet passer le relais à d'autres modèles valides à plus haute énergie et mettant en jeu de nouvelles particules élémentaires. Écrin de tous les imaginaires, cet excès a fait l'objet de plus de 500 publications scientifiques, principalement émanant de théoriciens, proposant autant de pistes que de particules : nouveau boson de Higgs, graviton ou encore particule de matière noire... « Quand j'ai entendu la rumeur de l'excès, 4 ou 5 jours avant sa présentation officielle au Cern, j'ai été très enthousiasmé et me suis immédiatement demandé si c'était le premier clin d'œil de la nouvelle physique, » relate Brando Bellazzini de l'institut IPHT du CEA. Les théoriciens ont alors intensivement travaillé à expliquer la « bosse » apparue sur les histogrammes dans diverses publications faisant intervenir des modèles théoriques en compétition. De leur côté, les expérimentateurs restaient circonspects face à l'euphorie générale. La raison en était toute statistique ! Car oui, pour conclure, il fallait attendre que le signal devienne significatif. Cinq sigmas, soit 99,999 % de chance que l'excès observé ne soit pas lié au hasard, est le minimum requis pour annoncer la découverte d'une particule. Dans le cas de la bosse à 750 GeV, sa signification fin 2015 était supérieure à 3 sigmas dans Atlas et CMS, ce qui est déjà respectable. Six mois plus tard, après une collecte de 13 fb<sup>-1</sup> de données supplémentaires (un exploit en seulement quelques semaines d'acquisition), la signification a décroché dans les deux expériences. Comme un ballon dégonflé, la bosse de 2015 n'est plus qu'une de ces aspérités statistiques qui se



Distribution de données de l'expérience Atlas, en fonction de la masse qu'aurait une particule se désintégrant en 2 photons. En 2015, un excès d'événements non significatif à 750 GeV ; en 2016, la disparition de cet excès.



## 5. Détection

Chaque collision crée environ 1 000 particules qui traversent des détecteurs, immenses appareils composés d'environ 100 millions de capteurs qui enregistrent des informations sur les particules toutes les 25 ns = 40 millions de photos numériques par seconde !

## 6. Sélection des événements

Chacune de ces photos est un « événement ». Les plus intéressants sont sélectionnés par un procédé de filtrage ultra-rapide (qui en garde 1 000 par seconde) et transférés au Cern pour être analysés en réseau (la grille) par les physiciens du monde entier.



forment quotidiennement sur les graphiques puis disparaissent avec plus de données.

**Brouillard dans le canal « diphoton »**

Si la bosse n'est pas un signal, qu'est-elle ? Une recherche classique au LHC consiste à reconstituer d'hypothétiques particules massives se désintégrant en deux photons. C'est précisément dans ce canal « diphoton » qu'a été observée une accumulation de paires de photons correspondant à une masse d'environ 750 GeV. À première vue, beaucoup d'événements banals produisent des photons de toutes provenances confondues, c'est le bruit de fond. Mais, s'il s'agit de la signature de la désintégration en deux photons d'une particule, celle-ci correspond à sa masse dite « invariante » : cette masse est calculée à partir des énergies et des angles des photons vus par les détecteurs lors des collisions de protons. C'est alors la valeur de cette masse singulière qui est scrutée.

Dans le cadre de la recherche d'une nouvelle particule, il est primordial de connaître le comportement du bruit de fond. Des simulations s'appuyant sur les prédictions du Modèle standard et des observations dans les données sont utilisées pour estimer la répartition (ou distribution) du nombre d'événements à deux photons, en fonction de la masse invariante. « *Le problème est qu'il n'existe pas encore de modèle fiable du bruit de fond aux hautes énergies pour le canal diphoton. L'estimation du bruit de fond à 750 GeV est délicate* », concède Gautier Hamel de Monchenault, physicien de l'Irfu pour l'expérience CMS.

**Des hauts et des bas statistiques**

Néanmoins, les outils statistiques permettent de juger de la cohérence des observations avec certaines hypothèses. Les mesures réalisées sont chacune affectées d'une incertitude statistique liée au nombre d'événements. Et moins il y a d'événements, plus les observations peuvent fluctuer autour de la valeur « théorique » du nombre d'événements. Il est donc nécessaire d'accumuler suffisamment de données pour être le plus discriminant possible, et s'assurer que l'excès observé est plus grand que les fluctuations du bruit de fond, lequel possède une distribution connue grâce à la simulation de processus physiques prévus par le Modèle standard. La question est alors : quelle chance reste-t-il que l'excès observé soit dû à une fluctuation statistique du bruit de fond ?

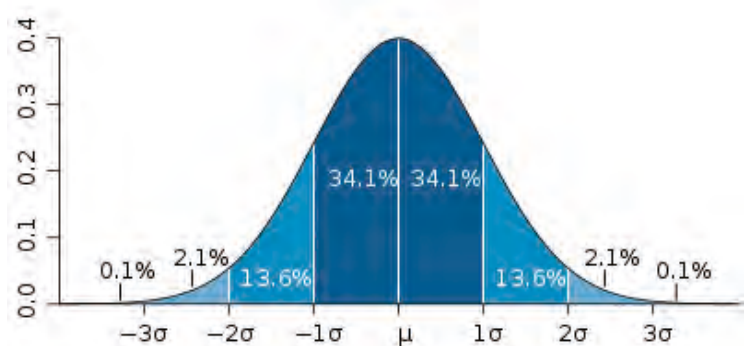
En utilisant la **loi gaussienne** pour la valeur moyenne attendue d'événements de bruit de fond au voisinage de la position de la bosse à 750 GeV, on obtient la probabilité d'observer un certain nombre d'événements, dans l'hypothèse où il n'y a pas de signal. « *Il s'agit de la probabilité que le nombre d'événements observés soit*

*une fluctuation statistique du nombre d'événements du bruit de fond attendus : c'est la valeur-p. Pour évaluer si un excès est significatif, on exprime cette probabilité en nombre d'écart standard (sigmas) par rapport à la valeur centrale pour une loi gaussienne* », explique Nathalie Besson, physicienne de l'Irfu. Les physiciens imposent en général que cette valeur-p atteigne au moins 5 sigmas ( $5\sigma$ ) pour conclure qu'un excès correspond à la découverte d'une nouvelle particule : il reste alors moins d'une chance sur 3,5 millions que l'excès observé soit dû à une fluctuation positive du bruit de fond.. Oui, les physiciens sont tatillons ! Et surtout très rigoureux car le temps de la science ne sacrifie pas à celui des agendas médiatiques...♦

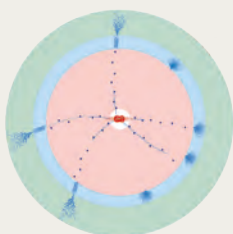
  
Nathalie Besson sur la chaîne  
Youtube du CEA  
<http://bit.ly/2b3tFYr>

**Loi gaussienne**

Loi de probabilité utilisée pour décrire les phénomènes naturels issus de plusieurs événements aléatoires.



Nombre de sigmas	Fraction de l'aire sous la gaussienne à $\pm i$ de la valeur moyenne :
$i=1$	0,6826 : « région à 68 % de niveau de confiance »
$i=2$	0,9545 : « région à 95 % de niveau de confiance »
$i=3$	0,9973 : que 0,27 % de chance d'observer un résultat hors de cette région.
$i=4$	0,999937 : 1 chance sur 15787,2 d'observer un résultat hors de cette région.
$i=5$	0,999999 : 1 chance sur 1 744 278,3 d'observer un résultat hors de cette région.



**7. Reconstitution**

Les données « brutes » sont transformées en quantités physiques (directions, courbures, énergies) qui, combinées, permettent de reconstituer les objets physiques tels que photons, électrons, muons...

**8. Calibration**

La position et les paramètres de mesure de l'énergie des différentes couches des détecteurs doivent être calibrés précisément pour que les résultats soient interprétés en tant que signaux physiques. La calibration s'appuie sur des simulations, affinées par les collisions réelles.

# Vers la « nouvelle physique »

Le LHC n'a donc pas encore trouvé de nouvelle particule. Mais pourquoi en chercher si le Modèle standard est complet ? Comme tout cadre théorique, il a été élaboré avec des limites que théoriciens et expérimentateurs essaient de lever, au-delà et même en son sein...

standard n'explique pas pourquoi il confère les valeurs particulières des masses des particules...

## Besoin d'énergie

Mais quand et où apparaîtra la physique au-delà du Modèle standard ? Les théoriciens s'attellent à trouver les passages possibles vers ces territoires inconnus, mais disposent de peu d'information. Néanmoins, ils fournissent de nouveaux modèles de référence (ou classes de modèles) aux expérimentateurs pour les aider à cibler leurs recherches. Si une des théories est validée par l'expérience, elle sera au Modèle standard ce que la théorie de la relativité d'Einstein est à la gravitation de Newton : une explication des phénomènes naturels valide à des énergies encore plus hautes, à des échelles encore plus petites. Plusieurs raisons amènent les théoriciens à penser que la nouvelle physique apparaîtra à une énergie explorée par le domaine actuel du LHC. « Il est en effet possible de générer une plus grande quantité de phénomènes rares. C'est un secteur énergétique où pourraient se produire des comportements inattendus de la **force électrofaible** liés à la présence de particules qui n'ont pas encore été mises en évidence » explique Brando Bellazzini.

## Les poupées russes

La quête des physiciens revient donc à établir le modèle qui, tel une poupée russe, engloberait les modèles effectifs précédents et résoudrait plus



d'énigmes, tout en étant plus simple. Il existe deux familles principales de théories prolongeant le Modèle standard dans le but de résoudre, entre autres, le problème de « hiérarchie de la masse du Higgs<sup>1</sup> » et celui de la « stabilité de l'échelle de Fermi<sup>2</sup> ». Ces familles sont la supersymétrie (SUSY) et la compositivité. SUSY résout le problème posé par la masse du boson de Higgs en introduisant pour chaque particule un super-partenaire possédant les mêmes caractéristiques mais de **spin** différent. La compositivité considère le boson de Higgs comme un état composite de particules plus fondamentales qui sont liées entre elles par

« Le Modèle standard est malade, nous lui avons collé beaucoup de pansements » plaisante Jean-François Laporte, physicien de l'institut Irfu dans l'expérience Atlas au LHC. Sous la forme de vingt paramètres, ces « pansements » permettent d'inscrire manuellement ces paramètres libres qui sont mesurés expérimentalement mais non prédits par la théorie, ce qui est insuffisant. De plus, il n'explique pas les phénomènes perceptibles à haute énergie, contient des incohérences sur le plan physique et ne parvient pas à répondre à toutes les questions fondamentales. « Par exemple, il n'inclut pas la matière noire, représentant pourtant 85 % de la matière de l'Univers ; ou ne permet pas de concilier la force de gravitation avec les trois autres interactions fondamentales (faible, forte et électromagnétique), rappelle Brando Bellazzini, théoricien de l'IPhT du CEA, en allant plus loin : le mécanisme de Higgs fournit la masse des bosons W et Z, messagers de l'interaction faible (à l'origine par exemple de la radioactivité), mais le Modèle

### Force électrofaible

Interaction entre particules élémentaires qui unifie la force électromagnétique et la force faible.

### Spin

Propriété quantique des particules, liée à leurs propriétés de symétrie.

### Notes :

1. Dont la valeur relativement faible est non-naturelle dans le cadre du Modèle standard.

2. Valeur caractérisant le potentiel du boson de Higgs après « brisure de symétrie ». Valeur attendue dans le vide du champ de Higgs.



## 9. Analyse des données

Les analyses reposent sur les données contenant l'intégralité des informations sur l'événement. Tous les résultats sont intégrés dans un histogramme qui permet de voir combien de fois une certaine valeur apparaît pour le calcul de la masse par exemple.

## 10. Comparaison avec des données simulées

Par exemple, une particule se désintégrant en deux photons apparaît sous la forme d'une « bosse ». Celle-ci se détache d'une distribution régulière issue des processus de bruit de fond, simulés, qui peuvent aussi produire deux photons.



de nouvelles interactions fortes. Et ces deux familles de théories prédisent l'existence de particules découvrables au LHC...

### Des objets virtuels, aux effets déjà perceptibles

Loin du sensationnel de la découverte directe de nouvelles particules, il existe une autre manière de repousser les frontières de la physique. Elle prend source dans la caractérisation des écarts au Modèle standard. En effet, la nouvelle physique peut se manifester dans de menues différences entre les prédictions du modèle et les données expérimentales. Depuis

cinq ans, Jean-François Laporte et ses collègues explorent ces zones avec minutie. « *Tant que l'énergie du collisionneur n'est pas suffisante pour exciter certaines particules, trop lourdes, elles restent virtuelles. Elles ne sont pas encore patentes mais sont déjà pertinentes, car leurs effets peuvent être perceptibles sans qu'elles puissent être elles-mêmes encore produites* » explique-t-il.

Par exemple, la radioactivité bêta, au cours de laquelle un neutron se désintègre en un proton, un électron et un antineutrino, résulte de l'échange d'un boson virtuel très lourd, le boson W. Le résultat de la désintégration est

connu (c'est une manifestation « effective » à basse énergie) mais son mécanisme est observable à une énergie bien plus élevée (équivalente à la masse du boson W). C'est pourquoi, en comparant la valeur des probabilités de désintégration prédites par le Modèle standard et les valeurs expérimentales, il est possible de mettre en évidence des écarts qui peuvent suggérer l'existence d'objets sous-jacents qui modifient les interactions entre les particules connues. Plus que jamais, le vide n'est pas l'absence de quelque chose mais bien une fenêtre sur l'inconnu.

### Avec ou sans modèle...

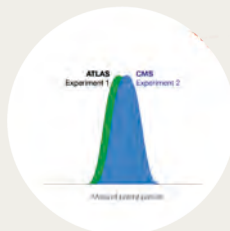
Deux approches complémentaires sont possibles. La première consiste à rechercher directement des particules spécifiques prédites dans des modèles. La seconde, dite « théorie des champs effectifs » (EFT), fournit des outils théoriques universels pour contraindre les manifestations d'une nouvelle physique sans dépendre d'un modèle en particulier qui a de nombreux paramètres. Elle porte sur la caractérisation des observations, et le cas échéant, d'anomalies, en se fondant sur des principes de physique généraux forts tels que les **invariances de jauge locales**. Théoriquement cohérente, l'EFT autorise en outre la combinaison de résultats de mesures très diverses ayant en apparence peu de liens. « *L'élaboration de ces analyses globales est un champ de recherches en pleine activité et la puissante synergie offerte par l'EFT est particulièrement excitante* » s'enthousiasme Jean-François Laporte. Ainsi va la nouvelle physique... ♦

### Invariance de jauge locale

Description des interactions fondamentales qui découle d'un principe de symétrie dans un cadre quantique et relativiste.

## 11. Bosses et statistiques

La découverte d'une nouvelle particule n'est effective que si l'excès d'événements (à une certaine valeur) par rapport à la distribution du bruit de fond a une signification statistique suffisamment élevée, exprimée et quantifiée à 5 sigmas (99,999 % de certitude).



## 12. Découverte et poursuite de l'exploration

Alors, et seulement alors, de nouvelles questions se posent. Les analyses permettent ensuite de faire progresser les connaissances, émerger de nouveaux modèles et prédictions... nécessitant de nouvelles expériences et moyens expérimentaux.

## Procédés

### Filières silicium en mode additif

Comment booster, à moindre coût, les filières silicium ? Le **Leti** et le **Liten** exploitent la **fabrication additive** pour réaliser des couches très épaisses (100 microns) ou des dispositifs de grande surface. Un premier résultat concerne une inductance radio-fréquence réalisée par sérigraphie, qui intéresse déjà un industriel. De même, un système de récupération d'énergie a pu être fabriqué avec un matériau piézoélectrique imprimé, non plus hybridé. *Minanews*

## Imagerie médicale

### Immunothérapie contre Alzheimer?

L'immunothérapie est à l'étude pour traiter les plaques amyloïdes du cerveau induites par la maladie d'Alzheimer. Pour l'évaluer, une équipe de l'**I<sup>2</sup>BM** développe une technique de microscopie par IRM qui permet désormais de suivre *in vivo* l'évolution de ces lésions microscopiques. Les examens révèlent que les plaques amyloïdes ne disparaissent pas spontanément mais que l'immunothérapie, mise au point par Sanofi, en prévient l'apparition. Des études cliniques sont en cours. *AG*

## Logiciels

### De la 2D à la 3D avec WiseBIM!

Très rapide, simple à utiliser et ne nécessitant aucune mesure sur site : la solution logicielle WiseBIM du **List** permet de générer des maquettes numériques 3D de bâtiments directement à partir de plans papier 2D. L'utilisateur fournit son plan, puis les algorithmes de WiseBIM identifient les éléments géométriques 3D, détectent les éventuelles erreurs et proposent des corrections le cas échéant. La maquette numérique est ensuite générée sous un format « .ifc » compatible avec la plupart des logiciels du domaine. *AG*

## Fabrication additive

Technologie qui consiste à créer un objet couche par couche, à partir d'un modèle numérique.



## Spectroscopie

### Pour mieux penser « Le Penseur »

Le musée Rodin a ouvert ses portes à des chercheurs du CEA! Objectifs: analyser par **spectrométrie Raman** la composition de la couche supérieure de sa célèbre statue « Le Penseur ». « *Nous souhaitons également comprendre les interactions de cette couche avec les revêtements organiques utilisés 4 ans plus tôt dans le cadre d'une restauration de l'œuvre d'art* » explique Delphine Neff, chercheuse au Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération de l'**Iramis**.

Sollicitée par le ministère de la Culture et de la Communication, son équipe a ainsi installé, en collaboration avec l'université Pierre et Marie Curie, un équipement de pointe autour de la statue pour réaliser l'acquisition de spectres en surface de la couche d'altération. Les analyses ont apporté les résultats suivants: la couche supérieure est très fine et se compose d'hydroxy sulfate de cuivre, un produit issu de la corrosion atmosphérique. Par ailleurs, les chercheurs ont mis en évidence, par endroits, des restes de cire utilisée pour la restauration. « *Cela valide les premières observations faites par les restaurateurs sur place* » indique Delphine Neff.

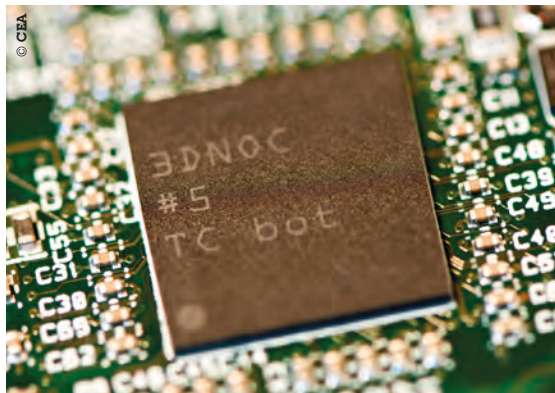
À travers ce travail de terrain, le CEA a pu valoriser son expertise dans l'étude et la modélisation de la corrosion et du vieillissement des matériaux, tel que le fer archéologique, sur le long terme. Il démontre par ailleurs la possibilité de mettre ce savoir-faire au service de la restauration d'œuvres d'art. *AL*

## spectrométrie Raman

Complémentaire de la spectroscopie infrarouge, cette technique met en évidence les vibrations moléculaires.

Microélectronique

## Le HPC fait des économies d'énergie !



Des calculs performants et moins énergivores, voici le credo d'une équipe du Leti qui développe une solution de communication sur puce pour le calcul haute performance (HPC). Compatible avec les architectures 3D, elle permet de transférer les données entre les processeurs des calculateurs *via* un réseau sur puce. « Nous avons "empilé" dans un même boîtier, les puces les unes sur les autres ou les unes à côté des autres sur un interposeur silicium » précise Denis Dutoit, responsable de programme au Leti.

Le démonstrateur montre des vitesses de transfert allant jusqu'à des centaines de Mbits par seconde, avec un encombrement minimal sur la puce de 40 µm par 40 µm, et la réduction d'un facteur 20 de l'énergie nécessaire par rapport à des puces placées sur une carte électronique. AG

Biodiversité

## Une nouvelle mission pour Tara : les récifs coralliens

Mai 2016, la goélette Tara quitte le port de Lorient pour sillonner les eaux du Pacifique. Objectif de cette nouvelle mission : étudier la biodiversité des récifs coralliens, du gène à l'écosystème. 16 personnes prennent part à l'aventure, dont des scientifiques du Genoscope (IG) qui se chargeront du séquençage des génomes et de leur analyse bioinformatique, comme pour les expéditions précédentes. Alors que les récifs coralliens couvrent moins de 0,2 % de la superficie des océans, ils réunissent près de 30 % de la biodiversité marine connue à ce jour, soit plus de 1 400 espèces. L'aventure sera donc très riche !

Cette mission permettra également d'explorer la capacité de résistance et d'adaptation de ces habitats face au changement climatique et aux pressions anthropiques, et de contribuer à développer des applications médicales. AL



Imagerie médicale



## Diminuer la dose de rayons X

Réduire la dose de rayons X délivrée lors d'un scanner, sans compromettre la qualité de l'image ni le diagnostic du radiologue. C'est désormais possible grâce aux efforts de recherche d'une équipe du List à DOSEO. Elle a en effet développé un logiciel capable d'établir, pour chaque patient, le paramétrage optimal d'une machine, et de réduire d'un facteur six la dose de rayons, pour une qualité d'image suffisante. Et ce, en combinant un algorithme d'estimation précise de la dose délivrée aux patients lors des protocoles d'imagerie scanner, et un outil de détermination de la dose de rayons nécessaire et suffisante pour un diagnostic sûr. L'Autorité de sûreté nucléaire a récemment pointé du doigt le risque d'augmentation des cas de cancers radio-induits par expositions répétées aux rayons X, en particulier chez les enfants. En proposant son logiciel aux fabricants de scanners pour l'intégrer à leurs futurs équipements, le List participe à une plus grande sécurité du patient dans les phases de diagnostic. AL

Accélérateur

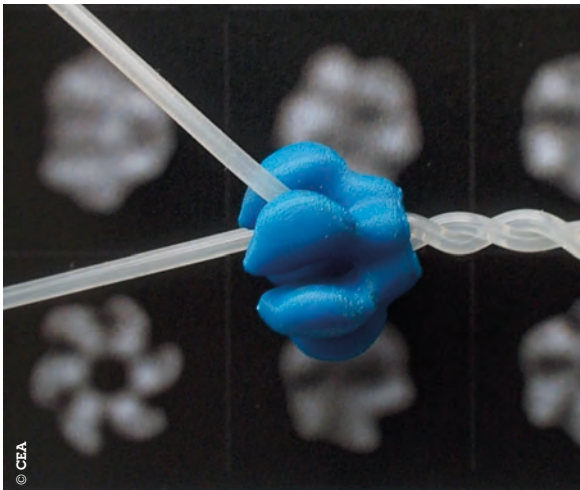
## Premier faisceau d'Iphi!

75 mA accéléré à 3 mV : Iphi produit son premier faisceau à l'Irfu. Cet injecteur de protons à haute intensité est composé de la source Silhi, d'une ligne de diagnostics et d'un étage d'accélération par un RFQ<sup>1</sup> fabriqué grâce au partenariat entre l'Irfu et deux industriels (Mécachrome et Bodycote). Fruit d'une collaboration de plusieurs années avec le CNRS et le Cern, Iphi verra sa phase de test d'acceptation d'un faisceau de 100 mA en continu démarrer prochainement. AL

Note :  
1. Radiofrequency  
Quadrupole.

Biologie structurale

## De la vaccine pour comprendre la variole



Hautement pathogène et contagieuse, la variole a officiellement été éradiquée depuis les années 1980. Mais pour se prémunir de son éventuelle réapparition, notamment parce qu'il existe des derniers stocks de virus en Russie et aux États-Unis, il importe de préparer de nouvelles stratégies de lutte. « Nous ne pouvons pas travailler directement sur ce virus, alors nous étudions celui de la vaccine, moins pathogène » explique Wim Burmeister, biophysicien à l'IBS dont l'équipe s'intéresse au mode de répllication du génome viral, nécessaire à la multiplication du virus. Avec l'institut de recherche biomédicale des armées, ils ont analysé la structure d'une protéine dont le rôle fait encore débat, la hélicase-primase. « La microscopie électronique avec coloration négative nous a permis d'accéder à sa structure à une résolution de 2 nm. En outre, des techniques d'anisotropie de fluorescence et de résonance plasmidique montrent l'interaction de l'hélicase avec l'ADN » indique-t-il. AG

## Immersion poétique dans les étoiles avec l'œuvre d'art numérique de Ryoichi Kurokawa



Installation  
« unfold » -  
Festival Scopitone  
Du 21 au 25 septembre  
2016, de 10h à 18h  
Château des ducs  
de Bretagne  
à Nantes

Comment situez-vous *unfold*  
par rapport à vos autres  
œuvres ?

L'image et le son sont omniprésents dans mes recherches et mes créations.

Je suis sans cesse en quête de synesthésie pour troubler et surprendre intensément le spectateur en lui faisant vivre des sentiments inédits. L'installation audiovisuelle *unfold* est donc une continuité de mon travail, avec en plus une immersion physique grâce à un sol tactile. Mais c'était la première fois que je travaillais directement avec des données scientifiques, ici sur la formation des étoiles, et que je collaborais avec un chercheur.

WWW

[www.stereolux.org](http://www.stereolux.org)



## Abonnement gratuit

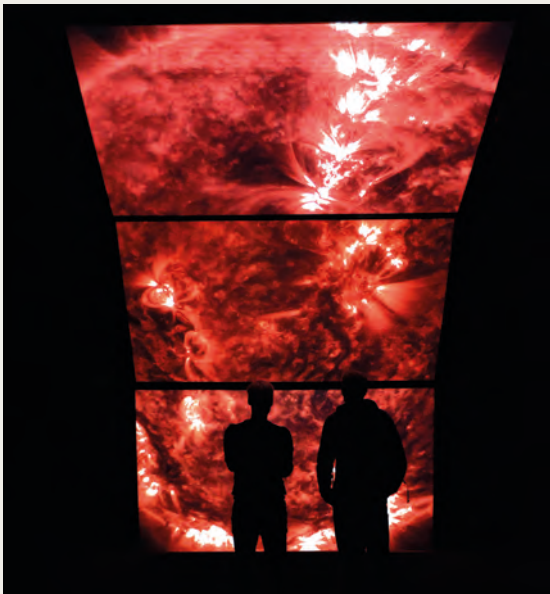
Vous pouvez vous abonner sur :  
<http://cea.fr/defis> ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse et profession à Les Défis du CEA - Abonnements. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.

### Que retenir de votre collaboration avec l'astrophysicien Vincent Minier ?

Notre rencontre, initiée par Stereolux, était vraiment stimulante. C'est toujours intéressant de travailler avec quelqu'un d'un autre domaine que le sien, et je sentais que Vincent était lui aussi très créatif ce qui a facilité les échanges. Il a pu m'expliquer des résultats de l'observatoire spatial Herschel sur la formation stellaire, de simulations numériques COAST et d'études sur le Soleil au CEA dont je me suis inspiré. Tout en me conseillant sur les phénomènes scientifiques à respecter. Une façon de faire qui a d'ailleurs influencé ma méthode de travail et m'a apporté de nouvelles idées pour la suite.

### Les données à traiter étaient inédites pour vous. Avez-vous rencontré des difficultés ?

Les informations correspondaient à la fois à des observations et à des simulations numériques. Elles étaient donc complexes à appréhender, avec des paramètres comme la dynamique, la densité, la température... Par ailleurs, le CEA m'a transmis plusieurs centaines de Téra de données qu'il a fallu que je déstructure pour les traduire dynamiquement dans un rendu artistique totalement nouveau. Mais ça en valait la peine, car aujourd'hui *unfold* propose de vivre en quelques minutes un événement qui se produit en plusieurs millions d'années!



### Événement

## « Science en direct »

25 ans de la Fête de la science : cette année encore le CEA répond présent en prenant part à un événement inédit qui réunit 14 institutions de recherche. Aux côtés de l'Irstea, de l'Inria, du CNRS, de l'Inserm ou encore du CNES, l'organisme occupera l'espace Forum de la Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris les 8 et 9 octobre. Ensemble ils vont offrir au public des débats, des manip' et démonstrations d'expériences, des quiz, ou encore des rencontres avec les chercheurs. Action insolite : des duplex en direct d'événements en région et de laboratoires seront organisés, avec notamment la découverte de l'Institut de génomique du CEA. Le tout sera présenté dans un espace scénique mis en place par l'association « Esprit sorcier » et animé par Frédéric Courant. Par ailleurs, l'ensemble de la manifestation sera relayé en direct pendant 48 heures sur toutes les plateformes internet des organismes de recherche partenaires et sur celles de plusieurs médias scientifiques, dont [www.lespritsorcier.org](http://www.lespritsorcier.org).



Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | Directeur de la publication Xavier Clément | Rédactrice en chef Aude Garnier | Rédactrice en chef adjointe Amélie Lorec | Ont contribué à ce numéro : Alice Mounissamy, Mathieu Grousson, Minat News et Vahé Ter Minassian | Comité éditorial Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Hélène Buret, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi, Camille Hansens et Sophie Kerhoas-Carvata | Iconographie Micheline Baryard | Infographie Fabrice Mathé | Photo de couverture Cern | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation [www.grouperougevif.fr](http://www.grouperougevif.fr) | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier Satimat, issu de forêts gérées durablement. Korus Imprimerie.



fête de  
la Science <sup>fr</sup>

# fête de la Science

du 8 au 16 octobre 2016

La fête de la science  
a 25 ans ! Une édition  
pour laquelle  
le ministère présentera  
des découvertes parmi  
les plus marquantes  
des 25 dernières années,  
en plus des habituelles  
manifestations  
organisées dans  
toute la France.