

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

206

Avril 2016

TOUT
S'EXPLIQUE

Supplément détachable
sur **les ondes**
gravitationnelles

02

L'INTERVIEW

◆ Victorien Erussard et Florence Lambert, un partenariat bien lancé pour l'expédition Energy Observer ◆

04

ACTUALITÉ

◆ N°1 mondial des organismes de recherche en termes d'innovation ◆ Stage de 3^e, la Science pour tous ◆ Coopération renforcée pour la recherche nucléaire ◆ Le CEA connecté aux Smart-grid ◆

07

SUR LE VIF

◆ Diabète : la fin d'un calvaire ◆ Nano-systèmes : une précision ultime à portée de main ◆

09

LE POINT SUR

◆ Le programme Astrid ◆

20

SCIENCES EN BREF

◆ Futures antennes 5G ◆ Nouveau débit record ◆ Collaboration prospère du Leti et du MIT ◆ Un réseau social planctonique qui régule le climat ◆ Vers un nouveau cocktail contre le cancer du rein ◆ L'héritage bactérien de la photosynthèse ◆ Expirez et le diagnostic sera fait ! ◆ Des lunettes pour voir le virtuel ◆ Souffler le sec et l'humide ◆

23

KIOSQUE

12

DOSSIER

Astrophysique

À l'écoute de l'Univers violent

VICTORIEN ERUSSARD,
Capitaine et co-leader de
l'expédition Energy Observer

**&
FLORENCE LAMBERT,**
directrice du Liten, institut
de CEA Tech, et « marraine »
d'Energy Observer

Energy Observer met le cap sur la transition énergétique, technologique et écologique



Sorti de l'imagination de deux navigateurs bretons¹ et de chercheurs isérois, le bateau Energy Observer est un mix énergétique à lui tout seul. Pour affronter les océans en toute autonomie, il bénéficiera d'une chaîne d'énergies renouvelables inédite, conçue, développée et intégrée par le CEA. Avec l'ambition de réconcilier technologie et écologie... et de le crier haut et fort sur les cinq continents.

Propos recueillis par Aude Ganier

Notes :

1. Victorien Erussard et Frédéric Dahirel (avec le designer Nigel Irens).
2. Détenteur du record du monde du Trophée Jules Verne.
3. Institut national de l'énergie solaire (CEA/CNRS/Université de Savoie/CSTB).
4. Le voilier Zéro CO₂ du CEA est au cœur d'un partenariat avec la Métropole de Nice et fait l'objet d'un nouveau projet européen de recherche, Cobra.

Quelle est la genèse du projet de catamaran électrique autonome en énergie, Energy Observer ?

Victorien Erussard : Frédéric Dahirel, avec qui nous avons remporté une seconde place sur la Transat Jacques Vabre 2007, en trimaran 50 pieds, m'a contacté fin 2013 alors qu'il ne pouvait pas poursuivre la réalisation de son trimaran solaire. Il avait toutefois récupéré les

deux flotteurs de l'ancien Enza, qui fut un jour le plus grand catamaran au monde². Il réfléchissait à un projet impliquant cette fois des éoliennes. Je lui ai suggéré une approche multisource intégrant aussi le solaire, l'hydrogène... J'en ai parlé à Nicolas Hulot, parrain de tous mes bateaux, qui a été emballé par cette idée de mixité énergétique, y voyant un symbole emblématique de la transition énergétique. Nous avons lancé le projet Energy Observer dans la foulée, un prototype expérimental destiné à tester l'efficacité des énergies renouvelables. Le reconditionnement de ce bateau de course de 101 pieds nous a ainsi permis d'investir un maximum dans la R&D plutôt que dans le composite.

Notre ambition est de réconcilier l'écologie avec la technologie, en montrant qu'elle est parfaitement conciliable avec la notion de confort. Tout comme nous voulons démontrer que notre modèle d'autonomie énergétique zéro carbone pourra être utilisé à grande échelle : entreprises, établissements publics, collectivités territoriales...

Comment vous êtes-vous rapproché du CEA ?

V.E : Nous avons besoin d'un partenaire très expérimenté et solide pour relever ce défi technologique. Je connaissais le CEA qui est le plus grand centre de recherche technologique français et j'avais découvert en 2009, au Salon Nautique, son voilier Zéro CO₂ qui m'a beaucoup inspiré. En février 2015, le ministère de l'Écologie et du Développement durable m'a orienté vers Vincent-Jacques le Seigneur, secrétaire général de l'Ines³. J'ai ainsi pu entrer en contact avec Florence Lambert, directrice du Liten, institut de CEA Tech, et Didier Bouix, ingénieur au Liten et « père » du voilier Zéro CO₂.

Florence Lambert : Notre collaboration avec Victorien Erussard a démarré dès mars 2015. Son projet s'inscrit parfaitement dans notre stratégie de valorisation de l'hydrogène dans la mobilité écologique, y compris maritime comme illustré par le voilier Zéro CO₂⁴. Avec l'approche « multisource » d'Energy Observer, nous pouvons aller plus loin. C'est une excellente opportunité pour disposer d'un démonstrateur



Nous avons besoin d'un partenaire très expérimenté et solide pour relever ce défi technologique.

Victorien Erussard, capitaine et co-leader de l'expédition Energy Observer

« bi-face » pour que les photons soient absorbés des deux côtés de la cellule, et valorisent autant le rayonnement direct du soleil que sa réverbération sur la mer et sur des surfaces réfléchissantes prévues à cet effet. Par ailleurs, notre maîtrise de l'encapsulation a permis de réaliser des modules conformables, courbes et rigides pour être installés sur les différentes surfaces du bateau et résister à la corrosion. Ces modules sont aussi revêtus d'un antidérapant adapté pour que les marins puissent marcher dessus.

Une autre brique importante concerne le système de pilotage de l'énergie et de distribution de toutes les charges pour la propulsion, l'alimentation électrique à bord, le stockage... Nos solutions logicielles embarquées pourraient d'ailleurs préfigurer de futurs smart-grids. Tout cela, sans parler des dispositifs de dessalinisation de l'eau, et de la valorisation de l'eau et de la chaleur des PAC pour l'eau ◆◆◆

Note :
5. La vitesse maximale pourra être de 50 nœuds.

à l'échelle réelle et d'un retour d'expériences pour valider toutes ses innovations, ce qui est fondamental dans la démarche du Liten.

Quel est précisément le système énergétique du catamaran ? Repose-t-il sur des ruptures technologiques ?

V.E : Nous avons établi avec Didier Bouix un cahier des charges sur-mesure : 130 m² de panneaux photovoltaïques pour l'alimentation électrique, avec couplage possible d'éoliennes à axe vertical ; des piles à combustible (PAC) pour leur fonction de prolongation d'autonomie ; des batteries Li-ion pour le stockage d'énergie court terme et la gestion des appels de puissance⁵ ; des réservoirs d'hydrogène pour le stockage d'énergie long terme, et même un électrolyseur pour produire *in situ* de l'hydrogène !

F.L : Pour Energy Observer nous devons lever trois verrous principaux : rendements énergétiques, masse embarquée, durée de vie des composants. Chaque thématique comporte des innovations conséquentes. Par exemple, l'intégration d'une chaîne complète

d'hydrogène (électrolyseur, réservoirs, PAC) est déjà une gageure sur Terre alors imaginez à bord d'un bateau ! Nous avons opté pour des panneaux photovoltaïques à « hétérojonction » pour lesquels nos cellules se situent parmi les meilleures au monde en termes de rendements de conversion. Ils ont une architecture électrique



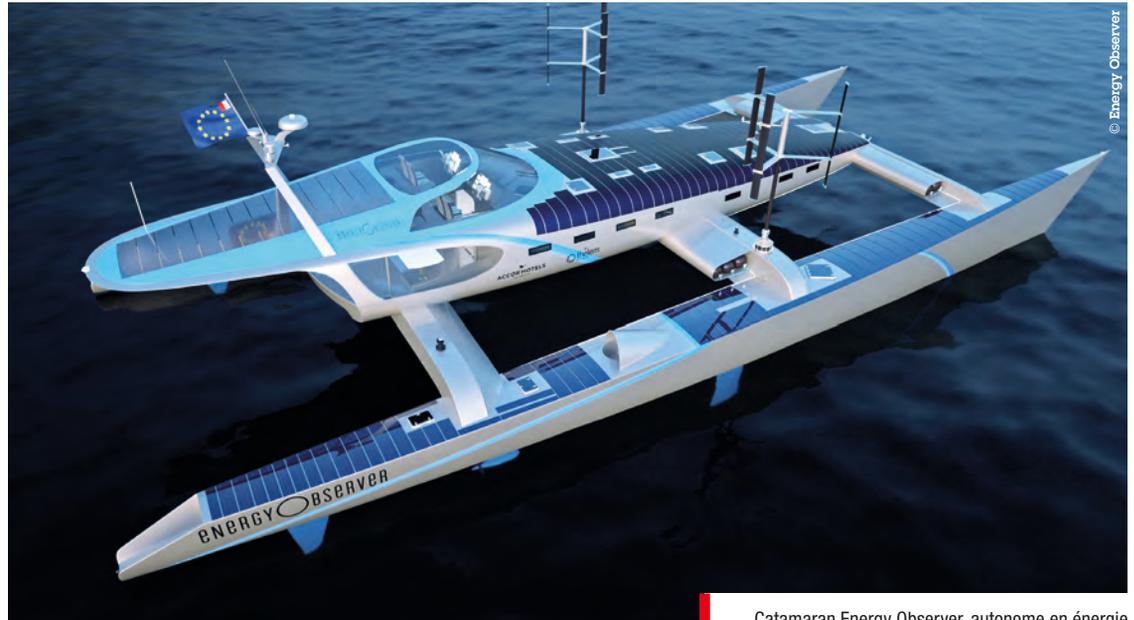
Présentation à la COP 21 en présence de Nicolas Hulot, parrain d'Energy Observer.

chaude sanitaire et même, dans une prochaine étape, pour produire du froid !

Je souhaite insister sur le fait que le Liten est sans doute le seul institut au monde à savoir combiner ces différents vecteurs énergétiques et ces compétences et savoir-faire multiples dans des systèmes complets et intégrés.

L'une des missions d'Energy Observer est également la sensibilisation du public aux solutions alternatives dans une démarche pédagogique innovante...

V.E : En effet, Energy Observer est une solution alternative parmi d'autres et notre mission, lors de 101 escales thématiques, sera d'en mettre d'autres en lumière. Je pense notamment, en France, à la société Algopack qui remplace le plastique avec un matériau à base d'algues, ou de Glowee qui va révolutionner l'éclairage urbain en exploitant la bioluminescence de bactéries des grands fonds marins. Nous sommes en relation avec ce type de start-up



Catamaran Energy Observer, autonome en énergie.

fait écho à la plateforme « Formation et Évaluation » de l'Ines qui prodigue des formations sur l'énergie, en particulier sur le solaire, dans tous les pays du globe. Dans ce contexte, Energy Observer sera un très bon outil et le réceptacle de nos formations.

intergouvernementales engagées sur les thématiques du développement durable et de l'éducation, ainsi qu'avec certains ministères. Nous l'annoncerons prochainement.

F.L : Cette approche est très intéressante puisqu'elle place les partenaires dans une configuration gagnant-gagnant. Pour le Liten, ce projet apparaît comme un trait d'union avec de nouveaux interlocuteurs pour démultiplier ce type de démonstrateur Zéro CO₂.

Pour le Liten, ce projet apparaît comme un trait-d'union avec de nouveaux interlocuteurs.

Florence Lambert, directrice du Liten, institut de CEA Tech, et « marraine » d'Energy Observer



pour voir comment Energy Observer peut les valoriser.

Avec Jérôme Delafosse, scaphandrier professionnel et réalisateur, mais aussi co-leader de l'expédition, nous développons une plateforme digitale innovante pour partager en direct cette aventure et nos découvertes. Nous prévoyons la réalisation et la diffusion régulière de documentaires et de programmes courts pour constituer un agrégateur de contenus audiovisuels autour de la transition énergétique, avec la volonté d'apporter des solutions concrètes, réalistes et applicables.

F.L : Cette dimension pédagogique

Quels partenaires soutiennent le projet Energy Observer ?

V.E : Nous sommes très attentifs à ce que nos partenaires soient fondamentalement mobilisés pour la transition énergétique et à ce qu'ils puissent bénéficier des découvertes que nous ferons. Nous comptons aujourd'hui deux partenaires officiels : les Groupes Accor-Hotels et Thélém Assurances. Nous sommes en discussion avec d'autres acteurs économiques car nous continuons à rechercher des soutiens. Nous sommes également en relation avec des agences

Florence Lambert, vous attendiez-vous à être la marraine d'un tel projet ?

F.L : Cette proposition traduit la confiance qui a présidé à nos nombreux échanges, avec Didier Bouix, pour mettre en œuvre ce projet. Je reste humble dans ce parrainage aux côtés de Nicolas Hulot, tant par la qualité de ses engagements que sa grande notoriété. Tout comme je suis humble face à Victorien Erussard, skipper très engagé et au prestigieux palmarès⁶.

J'y vois comme un clin d'œil, moi qui suis 100 % montagnarde et qui n'ai aucune connaissance de l'univers marin. Je suis très touchée d'être associée à ce Solar Impulse des mers, magnifique œuvre de la transition énergétique. ♦

Note :
6. Notamment, troisième à la Route du Rhum et deux fois deuxième à la transat Jacques Vabre.

www

www.energy-observer.org/
<http://liten.cea.fr/cea-tech/liten>

Propriété intellectuelle

N° 1 mondial des organismes de recherche en termes d'innovation



Vue intérieure du bâtiment Nanolnnov à Saclay.

Note :
1. Pour rappel, chaque année Thomson Reuters publie la liste des 100 organisations (publiques et privées) les plus innovantes dans le Monde, dont le CEA.

Le CEA est l'organisme public de recherche le plus innovant au Monde. C'est ce qu'annonce Thomson Reuters¹ dans son « *Top 25 Global Innovators - Government* ». Ce classement, établi pour la première fois, repose notamment sur le taux de brevets délivrés entre 2008 et 2013, soit 81,2 % pour le CEA sur les 2 252 demandes déposées. Et ce, principalement dans les domaines de l'énergie, des semi-conducteurs, de la chimie et des produits de consommation finaux. Parmi les critères de ce top 25 figure également le volume de citations de ces brevets par des chercheurs ou des industriels extérieurs, démontrant ainsi l'impact du CEA sur les activités de R&D d'autres organisations.

Selon l'administrateur général du CEA, Daniel Verwaerde, « *Cette position récompense les efforts du CEA pour valoriser le résultat de ses recherches et la reconnaissance internationale dont il bénéficie aujourd'hui. L'impact de nos brevets auprès du monde industriel et commercial est clairement démontré, ainsi que le professionnalisme des équipes en charge de la gestion de cette propriété intellectuelle.* » Le CEA est par ailleurs le 2^e déposant français en Europe, toutes sociétés confondues, d'après le bilan 2015

de l'Office européen des brevets. Une dynamique qui se manifeste notamment par la conclusion de nombreux partenariats industriels et la création d'entreprises issues de technologies du CEA.

À noter que les 2^e et 3^e places du top 25 de Thomson-Reuters sont occupées par la Fraunhofer (Allemagne) et le JST (Japon). Par ailleurs, trois autres organismes français sont présents dans ce classement : le CNRS (5^e), l'Inserm (10^e) et l'Institut Pasteur

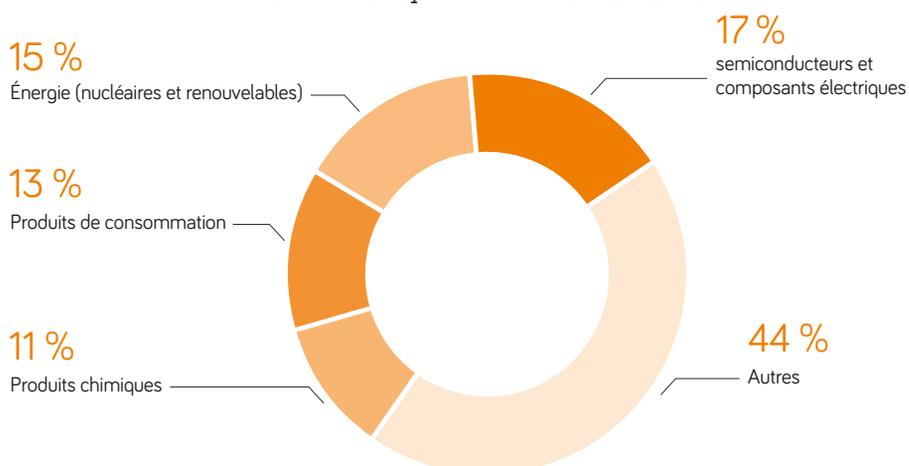
(17^e). Une belle illustration du rôle essentiel des organismes publics dans les avancées scientifiques et technologiques, et de l'excellence de la recherche en France.

81,2 %

TAUX DE BREVETS DÉLIVRÉS, SUR LES 2 252 DÉPOSÉS PAR LE CEA ENTRE 2008 ET 2013

Distribution en pourcentage et par famille des demandes de brevets déposées par le CEA entre 2008 et 2013.

Selon les analyses de Reuters Thomson.



Actions pédagogiques

Stage de 3^e, la Science pour tous

Dans le cadre de leur stage d'observation en entreprise, 24 élèves de 3^e du collège Robert Desnos d'Orly (94) sont venus découvrir le CEA et ses activités du 14 au 18 mars. Durant toute une semaine, ils ont visité plusieurs laboratoires et installations des centres CEA de Saclay et de Fontenay-aux-Roses. L'occasion pour ces futurs lycéens de rencontrer et d'échanger avec des scientifiques de diverses disciplines et qui sait, de voir naître l'envie d'épouser une carrière scientifique ! Quelques-uns des thèmes au programme : Mars et son robot Curiosity ; la radioactivité ; l'analyse et la surveillance de l'environnement ; la neurologie...

La 1^{re} édition de cette initiative « 3^e : stage de Science pour tous » du CEA à destination des élèves d'établissements en réseau d'éducation prioritaire a été un succès. Aussi, l'événement sera-t-il renouvelé pour la prochaine année scolaire !



Appels à projets

Le CEA connecté aux smart-grid

Le résultat de l'appel à projets « réseaux électriques intelligents », lancé en avril 2015, est dévoilé par les ministères de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer ; de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique. Trois dossiers sont retenus dont le projet Flexgrid, déposé par la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, qui implique le CEA. Il étudiera plusieurs thématiques à l'échelle du territoire : gestion des données, intégration des énergies renouvelables et des véhicules électriques, développement du stockage, bâtiments intelligents. Les lauréats pourront recourir au guichet des Investissements d'avenir afin de bénéficier d'un accompagnement financier.



Réacteur de recherche Cabri à Cadarache.

Collaboration franco-britannique

Coopération renforcée pour la recherche nucléaire

Le laboratoire de recherche nucléaire britannique (NNL) et le CEA signent, en marge du sommet franco-britannique d'Amiens, une lettre d'intention pour renforcer leur collaboration dans le domaine de la recherche pour l'énergie nucléaire civile. Les objectifs sont multiples : utilisation optimisée des installations de recherche et partage de l'expertise en R&D ; coopération sur les technologies et installations existantes, aussi bien sur leur conception, leur gestion que leur démantèlement ; coopération sur la R&D du cycle du combustible et la gestion long terme des matières nucléaires dans le cadre des futurs scénarios internationaux sur l'énergie nucléaire ; développement des réacteurs nucléaires du futur et des installations associées.

« *Le nucléaire civil redevient un sujet essentiel de la relation franco-britannique. La France et le Royaume-Uni ont une histoire de recherche nucléaire très proche, et ils font face aux mêmes défis ; un renforcement de la coopération entre le CEA et le NNL était dès lors logique et même indispensable. Elle est le complément scientifique de nos ambitions industrielles communes pour cette énergie* » s'est exprimé Daniel Verwaerde, Administrateur général du CEA.

Dispositif biomédical

Diabète : la fin d'un calvaire

Il va révolutionner le quotidien des personnes atteintes de diabète de type 1. Le premier pancréas artificiel français Diabeloop, actuellement en phase d'études cliniques¹, est développé par le CERITD² et le Leti, institut de CEA Tech. Commercialisation prévue fin 2017. *par Aude Ganier*

© Diabeloop

Pour imiter la fonction du pancréas défaillant, un modèle physiologique met en équation de nombreux paramètres.

Maeva Doron, chef de projet au Leti



Le capteur de glycémie et la pompe-patch pilotés par l'algorithme innovant d'une application pour smartphone.

En France, 200 000 personnes souffrent de **diabète de type 1**. Le seul traitement, en dehors de la greffe de pancréas, consiste en un « basal-bolus » : une insuline de longue durée pour couvrir les besoins nocturnes et une insuline d'action rapide au moment des repas. Si ce schéma fonctionne bien, il se heurte à des variabilités imprévisibles, liées à la physiologie, à l'activité physique et aux émotions. De fait, 50 % des patients peinent à équilibrer leur taux de glycémie malgré ces multiples injections. D'où l'ambition du CERITD de créer un pancréas artificiel en se rapprochant du **Leti/CEA Tech** en 2011. Fort d'un premier prototype innovant fin 2014, la start-up Diabeloop SAS a été fondée ainsi qu'un laboratoire commun.

La bonne dose au bon moment

Le dispositif est un système opérant en boucle fermée : un capteur (posé sur le ventre du patient) envoie toutes les cinq minutes le taux de glycémie à un smartphone qui calcule, via un algorithme personnalisé de régulation, la dose d'insuline nécessaire et en pilote la délivrance automatique par une pompe-patch ; le smartphone est également une interface avec le patient qui annonce ses repas et son activité physique, ainsi qu'avec un service de télémédecine spécialisé qui peut intervenir si besoin. « *L'innovation repose sur l'algorithme très complexe et son application dédiée. Pour imiter la fonction du pancréas défaillant, un modèle physiologique met en équations les nombreux paramètres influant les variations de la glycémie et prend en compte les données de base des patients (poids, âge, habitudes de vie, historique glycémique). Couplées au taux de glycémie mesuré en continu, ces données permettent de calculer la dose à injecter* » explique Maeva Doron, chef de ce projet au Leti.

Alors que de nouvelles études cliniques sont en cours, les ingénieurs affinent leur algorithme : amélioration de la prise en compte de la variation **circadienne** de la sensibilité à l'insuline, impact des repas, de l'activité physique, des émotions et du stress. « *D'ici un an, nous intégrerons des dispositifs pour prévenir le système que le patient bouge ou mange*³. Un logiciel de reconnaissance photographique des aliments pourrait aussi calculer automatiquement l'impact glucidique des repas... » confie Maeva Doron.

Notes :

1. Phases d'études cliniques entre mars et juin 2013, juillet 2014 et mars 2015 et depuis décembre 2015.
2. Centre d'études et de recherches pour l'intensification du traitement du diabète.
3. Avec des accéléromètres et des capteurs de rythme cardiaque.

Diabète de type 1

Maladie auto-immune qui détruit certaines cellules du pancréas et supprime la sécrétion d'insuline, rapidement mortelle si elle n'est pas traitée.

Circadien

Rythme biologique d'une durée de 24 heures.

Métrie

Nano-systèmes : une précision ultime à portée de main

Des chercheurs du **Leti**, institut de CEA Tech, mettent au point une méthode pour diagnostiquer les problèmes de performance des **nano-résonateurs** électromagnétiques (Nems). Un pas important pour faire des Nems un standard des mesures de précision.

par Mathieu Grousson

Nano-résonateurs

Nanosystème électromécanique (Nems) composé d'une « nano-corde » qui vibre à une fréquence de résonance donnée, laquelle change lorsque des particules (chimiques, biologiques ou autres) se posent sur le système, ce qui permet de les détecter.

Dispositifs électromécaniques nanométriques, les Nems, de par leur capacité à caractériser des objets nanométriques, promettent une révolution en chimie, biologie ou encore sciences de l'environnement. Pour autant, d'une sensibilité extrême, les Nems n'ont jamais pu être exploités jusqu'à leur limite théorique, ce qui faciliterait leur déploiement à l'échelle industrielle.

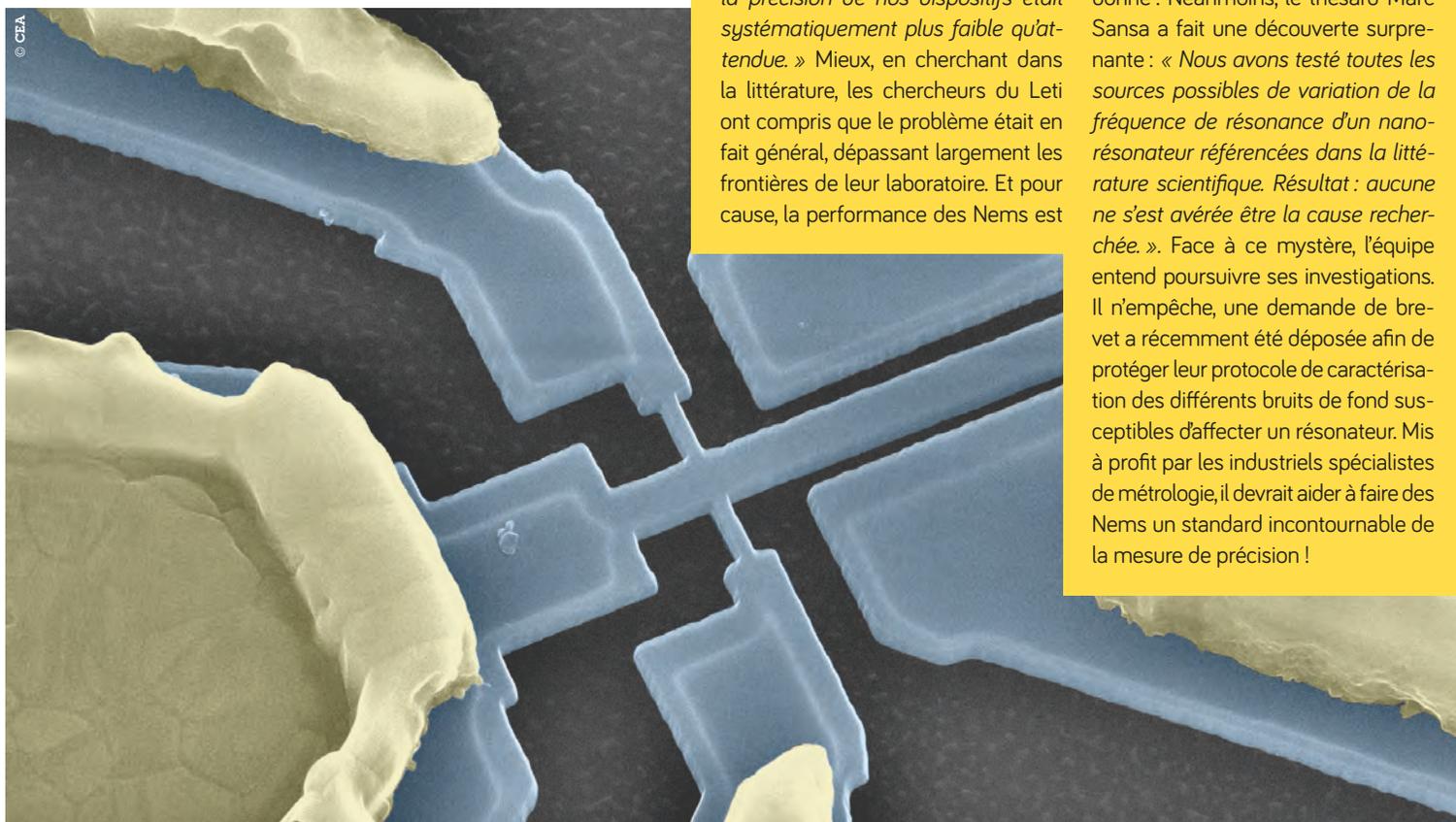
Leur principe ? Déterminer la masse d'une molécule via la mesure d'une fréquence de résonance. Or, comme le raconte Sébastien Hentz qui a dirigé une thèse à ce sujet, « nous nous sommes rendu compte que la précision de nos dispositifs était systématiquement plus faible qu'attendue. » Mieux, en cherchant dans la littérature, les chercheurs du Leti ont compris que le problème était en fait général, dépassant largement les frontières de leur laboratoire. Et pour cause, la performance des Nems est

traditionnellement évaluée en tenant compte des sources d'erreur possibles sur la mesure de décalage du signal électrique issu du résonateur. « Ces bruits de fonds sont bien connus et parfaitement maîtrisés mais nous avons découvert qu'un autre effet vient parasiter la limite de résolution de détection du système. Cet effet est intrinsèque, lié à une variation de la fréquence de résonance du résonateur. Les causes potentielles de ces variations sont nombreuses : variation de température, non-linéarités, mouvement de défauts de la maille cristalline, adsorption de molécules indésirables en surface du dispositif... »

Identifier les sources d'erreur pour repousser les limites de l'imprécision

Pour en avoir le cœur net, dès le début des années 2010, les scientifiques ont imaginé un protocole pour tester leur hypothèse avec leurs propres résonateurs en silicium monocristallin très pur. Cinq ans, plus tard, cette technique de diagnostic s'avère être la bonne¹. Néanmoins, le thésard Marc Sansa a fait une découverte surprenante : « Nous avons testé toutes les sources possibles de variation de la fréquence de résonance d'un nano-résonateur référencées dans la littérature scientifique. Résultat : aucune ne s'est avérée être la cause recherchée. » Face à ce mystère, l'équipe entend poursuivre ses investigations. Il n'empêche, une demande de brevet a récemment été déposée afin de protéger leur protocole de caractérisation des différents bruits de fond susceptibles d'affecter un résonateur. Mis à profit par les industriels spécialistes de métrologie, il devrait aider à faire des Nems un standard incontournable de la mesure de précision !

Note :
1. Publié dans *Nature Nanotechnology* (29.02.16)



Le développement de réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération est un maillon essentiel de la stratégie française pour le nucléaire du futur et la fermeture du cycle du combustible. Dans ce contexte, le CEA pilote, entouré de nombreux partenaires, la conception d'un démonstrateur technologique, appelé Astrid.

par Vahé ter Minassian



Moyens d'essais de systèmes innovants de détection de fuite.

Le programme **Astrid**

Cycle fermé

Traitement-recyclage du combustible usé en vue d'en récupérer les matières valorisables (uranium et plutonium) et de réduire le volume et la toxicité des déchets ultimes.

Note :

1. Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration

Permettre à la France de s'inscrire pleinement dans une vision durable de l'énergie nucléaire, en proposant des systèmes capables d'aller plus loin dans la stratégie de recyclage des combustibles et de tirer le meilleur parti des ressources, tel est l'un des grands enjeux du CEA. Y répondre passe par le développement de réacteurs nucléaires innovants et à neutrons rapides car seuls les neutrons rapides permettent de tirer parti efficacement des matières présentes dans les combustibles usés en réalisant **la fermeture du cycle** du combustible (voir encadré). Ainsi, depuis 2010, le CEA est chargé de mener pour la France les études de conception d'un démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), baptisé Astrid¹.

Ce démonstrateur doit apporter la preuve de fiabilité et d'opérabilité du réacteur dans la durée, tout en conduisant des démonstrations de multirecyclage des matières. L'objectif in

fine est de favoriser l'émergence d'une nouvelle génération de réacteurs à même de mieux gérer les matières, de répondre aux exigences de sûreté au moment de son déploiement et d'être compétitif sur le plan commercial. Comment? « *En se fixant des critères, bien qu'il soit impossible de prévoir la situation du marché du nucléaire à une échéance aussi lointaine* » répond Nicolas Devictor, chef du programme « réacteurs 4^e génération » de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) du CEA. L'une des missions du démonstrateur Astrid est par exemple, de démontrer que ces réacteurs de nouvelle génération pourront produire de l'électricité jusqu'à 90 % du temps.

Un concept de cœur breveté

Concrètement, où en est-on aujourd'hui? « *Au stade actuel des études, explique Nicolas Devictor, nous avons déterminé les principaux choix d'option de conception du réacteur et défini les options préliminaires de sûreté.* » Plusieurs modifications ♦♦♦

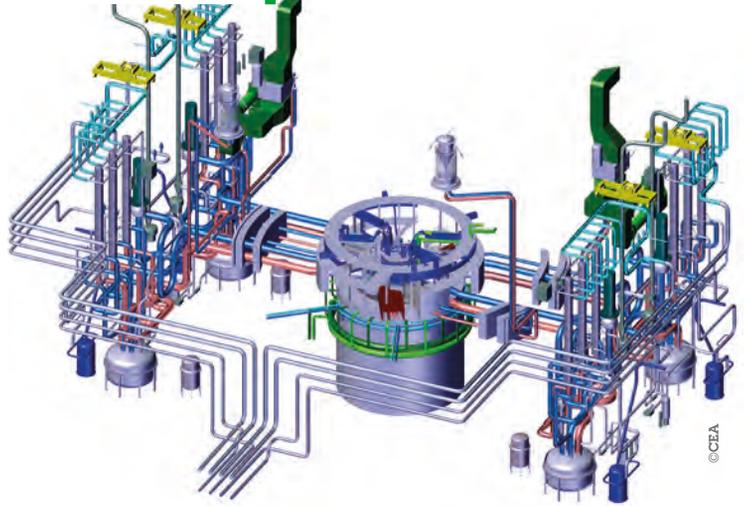
Optimiser le cycle fermé du combustible

Économiser la ressource. Réduire ses déchets. Ce grand défi industriel du XXI^e siècle, est aussi celui de la filière du nucléaire.

Dans ce secteur, il a conduit depuis quelques années à entamer une réflexion sur les technologies de réacteurs pour rendre le « cycle du combustible » à la fois plus efficace et plus vertueux. Avec un objectif, précise Nicolas Devictor chef du programme réacteurs de 4^e génération : « Optimiser la consommation du plutonium tout en valorisant les stocks d'uranium appauvris. » Qu'en est-il ? De nos jours, les REP (réacteurs à eau sous pression) du parc d'EDF produisent de l'électricité grâce à de l'uranium enrichi en uranium 235. Ils n'ont pas été conçus pour fissionner l'ensemble des isotopes du plutonium. Résultat : ce radionucléide n'est recyclable qu'une seule fois sous forme de combustible Mox. D'où la proposition de développer une filière de réacteurs dits à neutrons rapides (RNR) à même de « multi-recycler » le plutonium issu des combustibles usés, de valoriser sous forme de combustible l'uranium appauvri largement disponible ; et également d'envisager la possibilité de « brûler » certains déchets à vie longue : des actinides mineurs, comme l'américium.

majeures, constituant autant de ruptures technologiques, ont été proposées. L'une des plus importantes concerne le design du cœur d'Astrid. « Celui-ci est conçu avec l'objectif d'améliorer la sûreté de l'installation en cas d'accident et tout particulièrement en situations extrêmes », explique Jean-Claude Garnier, chargé du projet « conception du cœur » au CEA. Un nouveau mode d'agencement des combustibles sous forme d'un cœur innovant a été breveté. Son intérêt ? « De par ses caractéristiques, il peut faire baisser la puissance du cœur en cas d'augmentation anormale de la température du sodium ou de vaporisation de celui-ci. Cela permet ainsi de prévenir dans une grande majorité des cas l'occurrence d'un accident. Et dans une approche de défense en profondeur, au cas où il adviendrait malgré tout, cela permet de ralentir la progression d'un éventuel accident et, surtout, d'en réduire les effets. » Des situations très peu probables de dégradation du cœur ont aussi été prises en compte dès le début de la conception. Aussi, le projet prévoit-il d'équiper ce réacteur d'un « récupérateur de corium » : au-delà de 2000 °C – une température qui pourrait être dépassée en cas de vaporisation massive du sodium – le cœur se met à fondre et les combustibles et gaines qui le constituent finissent par former un « magma » qui s'écoule, le « corium ». Le récupérateur d'Astrid, une sorte de creuset placé au fond de la cuve, permettrait, le cas échéant, de contenir et d'étaler ce corium afin d'accélérer son refroidissement et de ramener le réacteur dans un état sûr sur le long terme.

Système de reconversion d'énergie eau-vapeur d'Astrid.



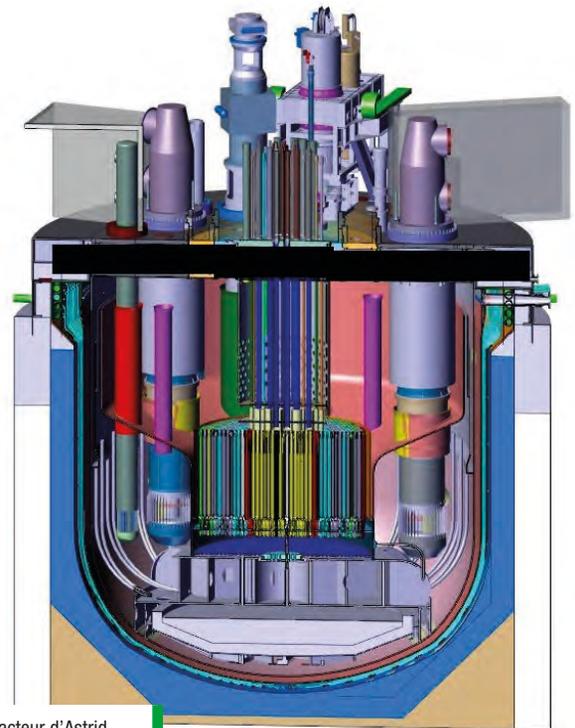
Des ruptures technologiques autour du sodium

D'autres ruptures technologiques portent sur le confinement du sodium liquide. Ce composé pouvant être, dans certaines conditions, très réactif chimiquement, les ingénieurs préconisent, pour éviter au maximum le risque d'accident, de l'éloigner, physiquement, de l'eau présente dans l'installation. « En pratique, une option peut être de ne plus utiliser l'eau comme fluide de travail du cycle de conversion d'énergie », indique Nicolas Devictor. Les chercheurs du CEA étudient la possibilité de lui substituer un gaz inerte, l'azote, ainsi qu'une turbine à gaz en remplacement de la turbine à vapeur. Le sodium chaud étant par ailleurs susceptible de s'enflammer au contact de l'air, les équipes se sont aussi penchées sur le problème de la détection rapide des fuites. Elles proposent de doter une partie de tuyauterie, d'un « calorifuge multicouche » high-tech breveté qui, utilisé à la façon d'un capteur, serait chargé de donner l'alerte en cas de dégradation de cette barrière de confinement. Enfin, d'importants travaux sont conduits sur les méthodologies d'inspection des cuves. En effet, sur Astrid, celles-ci ne peuvent être réalisées « à l'œil nu » comme cela est aujourd'hui pratiqué dans les centrales EDF car le sodium liquide est naturellement opaque. Les scientifiques développent des techniques nouvelles de contrôle non destructif, par « visualisation par ultrasons », et mettent au point des bras articulés capables de se déplacer dans ce milieu.

Qualification et validation par simulations et expérimentations

Pour les chercheurs et les ingénieurs, il s'agit désormais de définir plus précisément les composants du réacteur, et de qualifier et valider, par des simulations et/ou expérimentations, ses grands choix de conception. Différentes plateformes expérimentales ont été mises en œuvre à cet effet. La première permet d'étudier, en les simulant avec de l'eau, les phénomènes thermohydrauliques qui se produisent dans

la cuve du réacteur ou encore d'établir la faisabilité de principe d'un concept très innovant de barre d'arrêt à déclenchement hydraulique passif. La seconde, qui utilise du sodium entre 200 et 550 °C, sert à différents usages: qualification d'instrumentations très innovantes en vue de leur application dans Astrid; réalisation des tests de performance sur des maquettes à échelle réduite de composants, comme l'échangeur de chaleur sodium-gaz... Cela, en attendant la mise en fonctionnement vers 2020 d'une nouvelle plateforme qui permettra d'effectuer des essais de performances sur des composants représentatifs de ceux du réacteur Astrid. Pour qualifier les dispositions de conception destinées à maîtriser les conséquences d'une éventuelle fusion du combustible, l'installation Plinius 2 est en cours de conception pour étudier le comportement du « corium » et de ses interactions au contact du sodium et des matériaux constituant le récupérateur. Elle comportera ainsi un four capable de produire une masse de 500 kg de ce corium. Parallèlement, la maquette critique Masurca du CEA est rénovée. Ce dispositif d'étude de la physique neutronique sera utilisé pour vérifier, expérimentalement, les caractéristiques du cœur innovant d'Astrid en complément des calculs poussés obtenus par les codes de simulation numérique. ♦



Bloc réacteur d'Astrid.

Les partenaires d'Astrid

Pour la mise en œuvre du programme Astrid, le CEA, qui pilote l'ensemble des études et qui est chargé de la conception du cœur, est actuellement entouré de dix-huit partenaires industriels et de R&D. Ceux-ci participent au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur leurs fonds propres.

Airbus Defence and Space: fiabilité et sûreté de fonctionnement, process de traitement des déchets liquides et solides

Alcen: cellules chaudes d'examen des objets irradiés

Alstom: système de conversion d'énergie eau-vapeur et gaz

Areva NP: chaudière, contrôle commande et auxiliaires nucléaires

Bouygues: génie civil et ventilation

CNIM: valorisation de la chaleur pour optimiser le rendement du système de conversion d'énergie au gaz, faisabilité de l'industrialisation de composants innovants

Comex Nucléaire: innovations sur robotique et mécanismes de barres de commande

EDF: assistance à maîtrise d'ouvrage, retour d'expérience d'exploitation, des études de sûreté et de conception du cœur, de l'inspection en service et des matériaux (durée

de vie), contribution à la R&D en soutien à Astrid

ENEA: développement de matériaux de gaines avancées, caractérisation d'huiles haute performance en tant que caloporteur de circuit d'évacuation de la puissance résiduelle, dispositions de limitation des transferts de tritium

HZDR: instrumentations innovantes (débitmètre, monitoring de circuits d'essais électromagnétiques)

Jacobs France: moyens communs et infrastructures

JAEA, MHI et MFBR: conception de systèmes de sûreté d'Astrid et contribution à la R&D associée

KIT: contribution aux études de comportement du corium

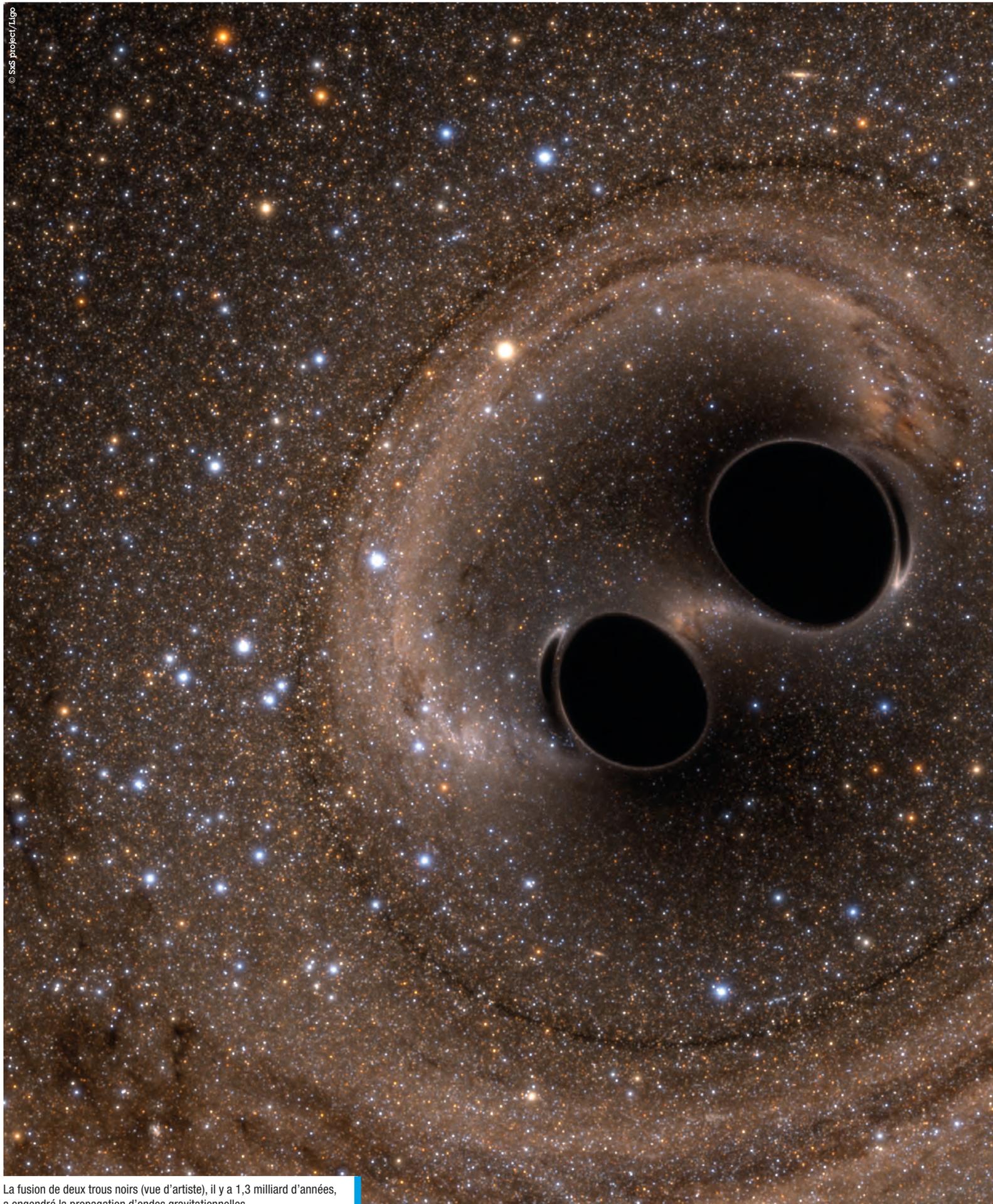
PSI: contribution aux études de thermohydraulique du cœur

Rolls-Royce: échangeurs compacts sodium-gaz

TOSHIBA: pompes électromagnétiques de grande taille et traducteurs acoustiques multi-éléments

Velan: conception et développement de vannes sodium d'isolement sur la boucle secondaire

Technetics: développement de solutions innovantes d'étanchéité pour les traversées de dalle et la robotique



La fusion de deux trous noirs (vue d'artiste), il y a 1,3 milliard d'années, a engendré la propagation d'ondes gravitationnelles...

Astrophysique

À l'écoute de l'Univers violent

P.14

Le jour où
l'espace-temps
a tremblé

P.16

Tous les détecteurs
en alerte

P.19

Le graviton,
graal ultime

La communauté scientifique est en émoi. Les ondes gravitationnelles, ces déformations de l'espace-temps prédites par Albert Einstein dans sa fameuse théorie de la relativité générale, existent donc bel et bien.

Celles qui ont fait tressaillir les détecteurs américains de l'expérience Ligo, le 14 septembre 2015, résultent de la fusion de deux gigantesques trous noirs, il y a 1,3 milliard d'années. Cette découverte ouvre la porte sur une nouvelle lecture de notre Univers, à travers l'étude des indices laissés par des phénomènes cosmiques jusque-là inobservables. Une aventure à laquelle le CEA participe déjà.

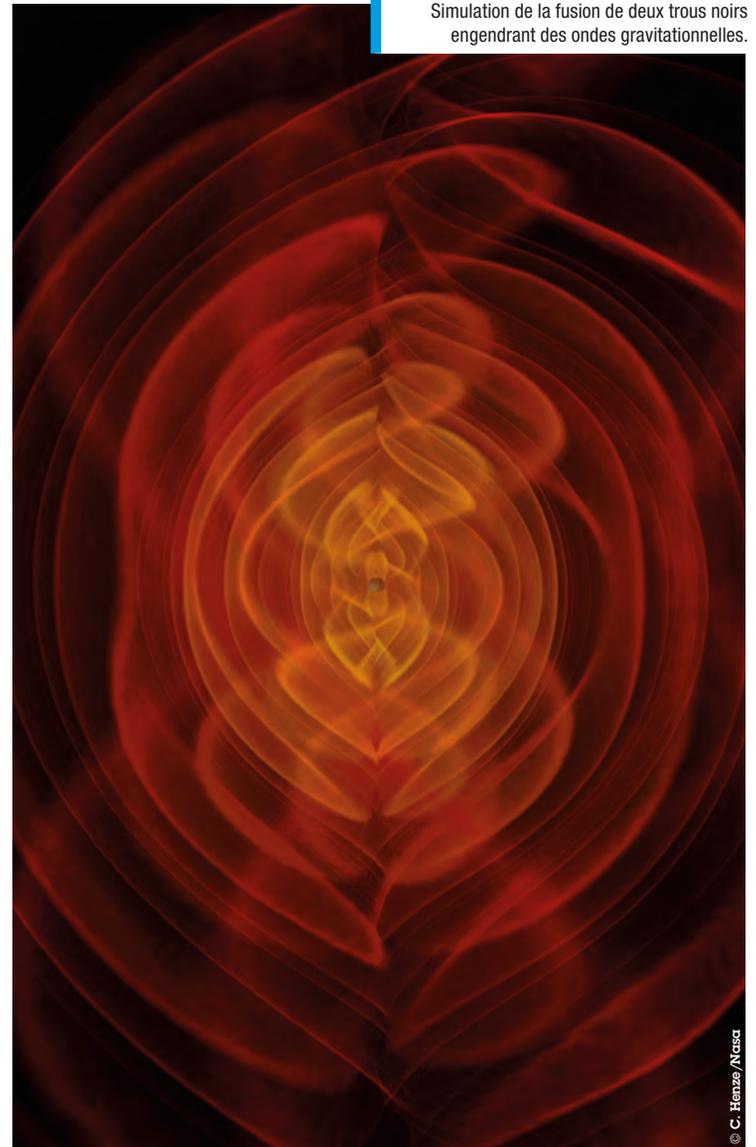
par Fabrice Demarthon

Le jour où l'espace-temps a tremblé

Einstein avait prédit leur existence il y a cent ans. Les ondes gravitationnelles détectées le 14 septembre dernier par l'expérience américaine Ligo ne viennent pas seulement valider cette théorie et confirmer l'existence des trous noirs ; elles ouvrent aussi la voie à une nouvelle astronomie, pour aller plus loin dans notre compréhension de l'univers et des objets qui le peuplent.

Le 14 septembre 2015 est à marquer d'une pierre blanche dans l'histoire de la physique et de l'astronomie. Ce jour-là, pour la première fois, les détecteurs américains Ligo frémissent au passage d'une onde gravitationnelle, une infime fluctuation de l'**espace-temps** prédite il y a un siècle par Albert Einstein. L'événement, rendu public cinq mois plus tard, secoue la communauté scientifique ; le célèbre astrophysicien Stephen Hawking n'hésitant pas à le qualifier de « révolution pour l'astronomie »¹. Au CEA, les chercheurs qui étudient les phénomènes cosmiques les plus violents et la physique dite « des hautes énergies » ne sont pas moins enthousiastes : la détection des ondes gravitationnelles ouvre d'incroyables perspectives dans leurs domaines d'investigation.

Einstein avait raison... et tort
Pourquoi un tel engouement ? Parce qu'avant tout, l'observation des ondes gravitationnelles, très attendue, est une nouvelle preuve en faveur de la théorie de la relativité générale d'Einstein ; théorie sur



Simulation de la fusion de deux trous noirs engendrant des ondes gravitationnelles.

Espace-temps

Représentation mathématique qui associe l'espace et le temps. L'espace-temps a 4 dimensions : 3 dimensions spatiales et 1 dimension temporelle.

Trou noir

Objet céleste si dense que rien – ni matière ni onde électromagnétique – ne peut échapper à son attraction.

Note :

1. Source : BBC, 11 février 2016.

laquelle ne repose rien moins que notre compréhension de l'Univers ! « C'est une très belle confirmation de la validité de la relativité générale dans des conditions que nous n'avions encore jamais explorées », indique Pierre Vanhove, membre de l'Institut de physique théorique du CEA (IPHT/CEA). Les conditions en question, ce sont des champs de gravitation immenses : l'onde a

été produite par le mouvement d'attraction de deux **trous noirs** jusqu'à leur fusion pour n'en former qu'un. Parue en 1915, la théorie de la relativité générale décrit la gravitation comme une courbure de l'espace-temps. Ainsi, toute masse « creuse » la trame de l'espace-temps, un peu comme le fait une balle posée sur un drap tendu. Plus la masse est importante, plus la courbure s'intensifie et

plus le « puits » de gravité est profond. De cette définition découle l'existence des trous noirs : lorsqu'une masse gigantesque est concentrée en un point, le puits de gravité est sans fond. Rien ne peut plus en sortir, pas même la lumière ! En 1916, Albert Einstein émet une autre hypothèse, conséquence de la première : lorsque des masses subissent une accélération, elles font vibrer l'espace-temps, produisant une onde comparable aux rides qui se propagent à la surface de l'eau lorsqu'une pierre la frappe. La fameuse onde gravitationnelle.

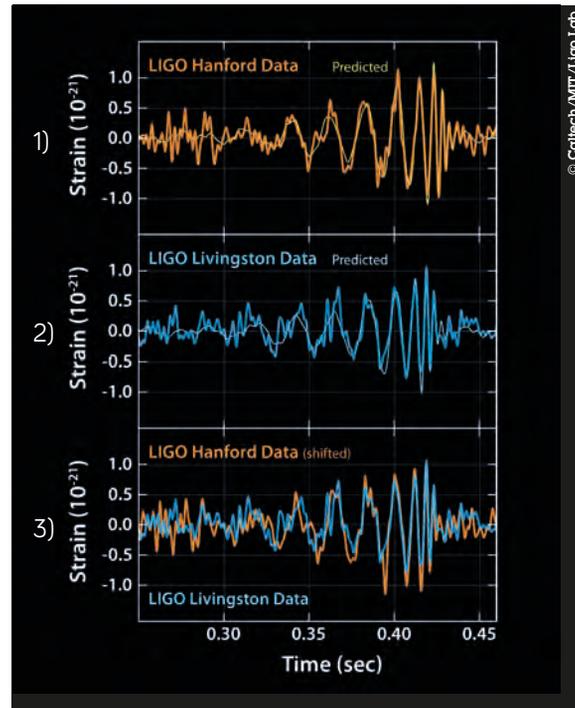
Toutefois, la déformation de l'espace-temps – qui s'avère très « rigide » – est infime : mille voire dix mille fois plus petite que la taille d'un proton (10^{-18} à 10^{-19} mètres). Des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées sur Terre doivent donc provenir d'événements cataclysmiques, mettant en jeu de très grandes masses subissant de fortes accélérations. Même Einstein a douté qu'il puisse être un jour possible de les observer, allant même jusqu'à réfuter leur existence quelques années après les avoir prédites ! Einstein avait donc raison et tort à la fois.

Installés aux États-Unis, les deux détecteurs de l'expérience Ligo ont réagi au passage d'une onde gravitationnelle ayant pris sa source à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre, quelque part au-dessus de l'hémisphère sud. Deux trous noirs, l'un d'environ 36 masses solaires, l'autre d'environ 29 masses solaires, ont fusionné dans une danse spirale. Le cataclysme, qui n'a duré que deux dixièmes de seconde, a donné naissance à un trou noir d'environ 62 masses solaires et a libéré une onde gravitationnelle d'une énergie équivalente à 3 masses solaires (selon la célèbre formule d'Einstein, $E=mc^2$). « Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision », explique Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien de l'institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu/CEA).

Vers une nouvelle astronomie

La confirmation de la théorie d'Einstein n'est évidemment pas la seule conséquence de cet incroyable exploit technique. Elle est aussi la preuve de l'existence des trous noirs. « C'est la découverte dans la découverte, s'enthousiasme Jérôme Rodriguez, autre chercheur de l'Irfu/CEA. Même s'ils font partie du bestiaire cosmique depuis un moment, les trous noirs sont des objets avant tout mathématiques dont la réalité est parfois remise en question. Jusqu'à maintenant, nous n'avions que des preuves indirectes de leur existence. » Non seulement l'observation des ondes gravitationnelles démontre la réalité des trous noirs mais elle révèle aussi qu'ils peuvent former des duos, à l'instar des systèmes binaires d'étoiles. Une sacrée surprise pour ceux qui les étudient. L'événement donne enfin un coup d'accélérateur énorme à l'astronomie dite gravitationnelle, à savoir l'étude de l'univers à travers l'analyse de ce type d'ondes. Et les découvertes pourraient être nombreuses tant ces ondes peuvent voyager, quasi librement, sur des distances infinies alors que la lumière rencontre de nombreux obstacles sur son parcours². Jusqu'à maintenant, ce champ de recherche se cantonnait à la théorie,

à la mise au point de détecteurs et à la simulation numérique. Dorénavant, il va pouvoir se déployer à partir de résultats expérimentaux. « Les ondes gravitationnelles sont porteuses d'informations précieuses sur les événements qui les ont produites, précise Pierre Vanhove. Elles peuvent donc nous renseigner sur certains objets



Signaux des ondes gravitationnelles, détectés par chacun des instruments de Ligo et corrélés aux équations de la théorie générale (1 et 2) ; et leur superposition montrant que l'expérience a détecté le même événement (3).

peuplant l'univers, même si ceux-ci n'émettent pas ou très peu de lumière. » Des objets comme les trous noirs, donc, mais aussi les étoiles à neutrons, issues de l'effondrement du cœur d'étoiles massives, ou encore les cordes cosmiques,

Masse solaire

Unité de mesure de la masse des objets peuplant l'univers. Elle correspond à la masse du Soleil.

Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision entre deux trous noirs.

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, de l'Irfu/CEA

déformations de l'espace-temps qui formeraient des lacets dans l'univers et que les théories physiques les plus modernes pensent être capables de produire des ondes gravitationnelles. On aurait donc pu penser que l'observation de ces ondes le 14 septembre 2015 était un aboutissement. Il s'agit au contraire du début de l'aventure. ♦

Note :
2. La lumière se propage également sur des distances infinies mais est déviée par les corps célestes ce qui rend difficile la localisation de sa source.

Tous les détecteurs en alerte

Les ondes gravitationnelles décelables sur Terre résultent de phénomènes cosmiques dégageant une énergie colossale, et qui peuvent parfois s'accompagner de brefs éclairs lumineux. Les astrophysiciens espèrent les détecter à l'aide de télescopes opérant dans l'espace ou depuis le sol. Encore faut-il les braquer dans la bonne direction et au bon moment !

Pour être décelées sur Terre, les ondes gravitationnelles doivent être produites par des événements cosmiques spectaculaires, tels que la fusion de deux objets compacts et massifs, trous noirs, étoiles à neutrons, explosion d'étoiles massives... Et certains de ces cataclysmes émettent aussi des quantités phénoménales de lumière, parfois comme de brefs éclairs. Cette opportunité, les astrophysiciens ne veulent pas la laisser passer. Aussi la traque des ondes gravitationnelles s'accompagne-t-elle de la recherche d'ondes électromagnétiques comme les rayons gamma, les rayons X, voire la lumière visible. Dans le jargon, on parle de « contrepartie lumineuse » et, en la matière, les chercheurs et ingénieurs du CEA font montre d'une véritable expertise.

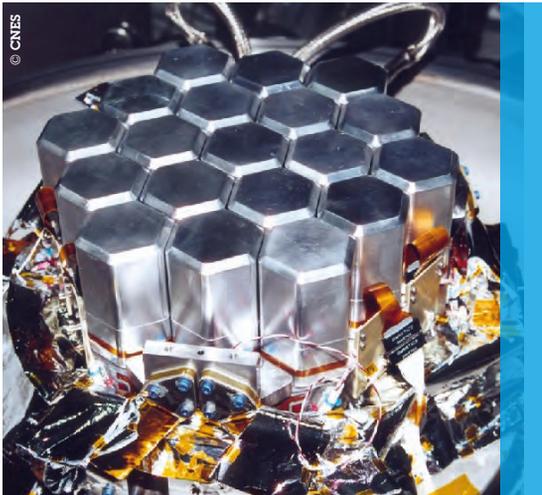
des sources cosmiques des éléments chimiques. Lancé en 2002 par l'Agence spatiale européenne, il s'agit de l'observatoire de rayons gamma le plus puissant jamais conçu. Les deux gamma-caméras, dont l'une réalisée par le CEA, de l'un des deux télescopes d'Intégral sont encore à ce jour les plus grandes et les plus sensibles qui existent : un atout formidable pour l'observation d'une éventuelle contrepartie lumineuse aux ondes gravitationnelles. Philippe Laurent, l'un des responsables scientifiques de la mission Integral à l'Irfu/CEA, fait partie du cercle des initiés qui reçoivent les alertes de l'expérience américaine Ligo : « *Un accord a été conclu entre la collaboration Ligo/Virgo¹ et plusieurs équipes pilotant des observatoires astronomiques – satellites et télescopes au sol – afin qu'elles soient prévenues très rapidement lorsqu'une onde gravitationnelle est captée et puissent observer la portion du ciel d'où elle provient.* » Pour cette première du 14 septembre 2015, l'alerte n'a toutefois été donnée que le lendemain. Prudents, les scientifiques de Ligo ont préféré attendre d'être sûrs de ce qu'ils avaient découvert avant de

Note :

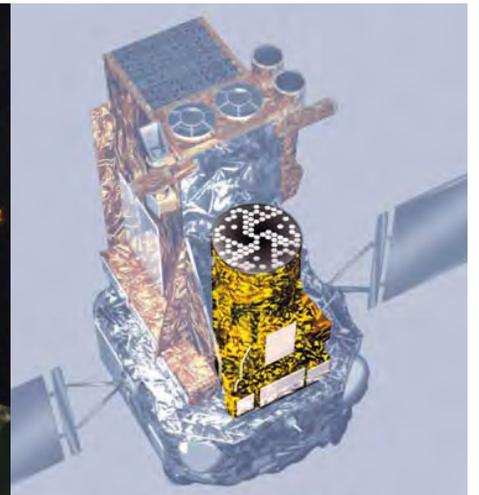
1. Virgo est l'équivalent européen de Ligo. Le détecteur est situé près de Pise, en Italie. Il était en remise à niveau lorsque Ligo a capté l'onde gravitationnelle le 14 septembre 2015.

Expertise astronomique intégrale

En bonne place dans leur arsenal de détection figure le satellite Integral, destiné à l'étude des phénomènes énergétiques de l'univers et à la recherche



Instrument SPI, intégrant une gamma-caméra du CEA, du satellite Intégral.



prévenir leurs confrères. Dans ce cas, le retard n'est pas si grave puisque, théoriquement, la fusion de deux trous noirs (comme captée par Ligo) qui ne sont pas environnés de matière n'est pas censée émettre de lumière.

Les responsables d'Integral ont quand même épluché les données enregistrées ce jour-là. « *Nous n'avions pas une localisation suffisamment précise² pour pointer Integral vers la source de l'onde mais nous disposons d'un système qui enregistre en permanence les flux de particules provenant de n'importe où dans le ciel* », indique Philippe Laurent. Cet appareil, appelé système d'anticoïncidence, est le bouclier du spectromètre SPI qui est le deuxième télescope à bord du satellite. En enregistrant toutes les particules en provenance de l'espace, l'anticoïncidence permet aux scientifiques de séparer le **bruit de fond** des signaux qui les intéressent réellement. « *Comme nous pouvions nous y attendre, nous n'avons rien décelé de particulier* », relate l'astrophysicien. Mais l'équipe est prête : à la prochaine alerte, Integral pourra être repositionné en quelques heures pour capter un éventuel éclair de rayons gamma associé à une onde gravitationnelle.

Des observations sur tous les continents

L'observation de ces éclairs gamma, encore appelés sursauts gamma, est l'objectif d'une autre mission en cours de préparation au CEA : SVOM³. Ce mini-satellite franco-chinois doit être lancé en 2021. À son bord, quatre instruments : un télescope dans les domaines X « durs » (les rayons X les plus énergétiques) et gamma, déclencheur de l'alerte du sursaut (ECLAIRS) ; un ensemble de détecteurs gamma fonctionnant à plus haute énergie (GRM) ; un télescope X (MXT) ; et un télescope scrutant dans le visible et le proche infra-rouge (VT). Grâce à

eux, SVOM transmettra la position du sursaut gamma en temps quasi réel via des antennes réparties à la surface du globe. L'information sera alors relayée à des télescopes robotisés au sol fonctionnant dans le visible et le proche infra-rouge. Deux d'entre eux, l'un situé en Chine, l'autre au Mexique, prendront le relais afin d'affiner la position et d'évaluer la distance du sursaut. « *Le calcul des coordonnées de la source par le microprocesseur embarqué à bord du satellite pourra prendre de 10 millisecondes à 20 secondes, explique Bertrand Cordier, chercheur Irfu/CEA et responsable*

scientifique de la mission côté français. SVOM sera alors automatiquement réorienté pour que ses télescopes puissent observer rapidement une éventuelle contrepartie en rayons X ou en lumière visible du sursaut gamma. »

Autant dire qu'avec sa rapidité, SVOM pourra aussi réagir aux alertes envoyées par les équipes lancées dans la chasse aux ondes gravitationnelles. L'annonce de Ligo est d'ailleurs un fabuleux coup de pouce pour la mission, qui a connu une gestation chaotique. « *La détection des ondes gravitationnelles par Ligo* ♦♦♦

Bruit de fond

Ensemble des particules cosmiques pouvant parasiter la détection d'objets spécifiques.

Notes :

2. Plus le nombre de détecteurs répartis sur la Terre est important, plus la localisation de l'onde gravitationnelle est précise. Celle du 14 septembre 2015 n'a été repérée que par Ligo, rendant sa position difficile à évaluer.

3. *Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor.*



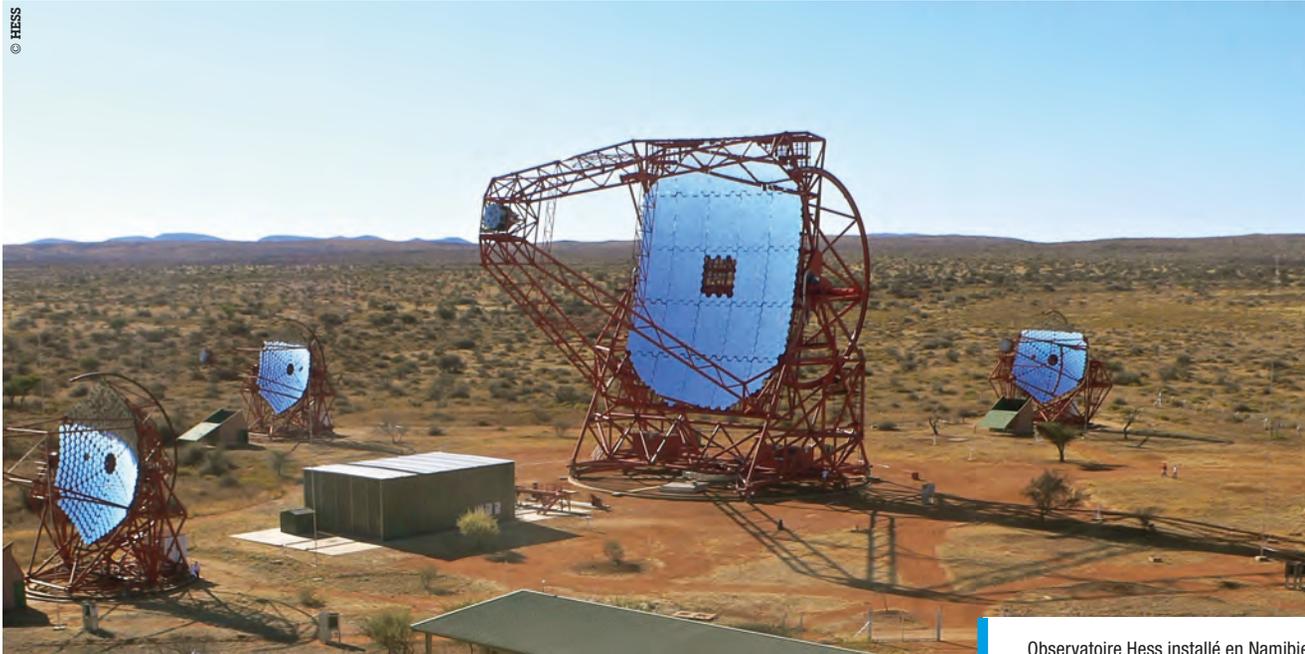
Satellite Integral.

© Integral

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers le plus violent vient de s'ouvrir. Imaginez tout ce que nous pourrions apprendre lorsque nous verrons aussi la contrepartie lumineuse des ondes gravitationnelles !

Fabian Schüssler de l'Irfu/CEA





Observatoire Hess installé en Namibie.

- Notes :
4. Observation des rayonnement gamma à très haute énergie pour sonder l'origine du rayonnement cosmique ou étudier les processus d'accélération, par exemple dans les noyaux actifs de galaxies.
 5. Cherenkov Telescope Array (réseau de télescopes tcherenkov).

conforte nos objectifs scientifiques, indique Bertrand Cordier. *Jusqu'à présent, notre volonté d'assurer une surveillance du ciel 24 h sur 24 dans le cadre des recherches sur les ondes gravitationnelles se heurtait à des difficultés techniques et financières, ces ondes n'étant alors que pures hypothèses théoriques. Maintenant que nous les savons réelles, le système de surveillance et la chaîne d'alerte automatiques de SVOM sont encore plus légitimes.* » La détection par Ligo arrive d'ailleurs à point nommé : la conception définitive de la mission sera décidée à la fin de l'année 2016.

L'espace et le sol en alerte

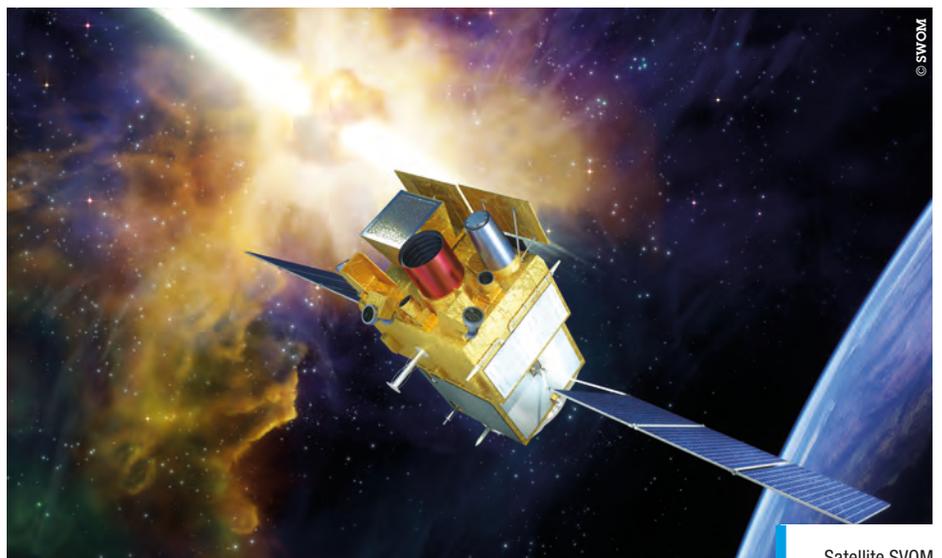
Au sol, les télescopes robotisés de SVOM ne seront pas les seuls à pointer leurs miroirs vers le ciel à la recherche de la contrepartie lumineuse des ondes gravitationnelles. D'autres instruments font partie de la traque. Le télescope Hess, par exemple. Installé en Namibie, cet ensemble de cinq télescopes est dédié lui aussi à l'étude des rayons gamma de très hautes énergies en provenance de l'espace. Or, Hess II, le télescope central, mastodonte de 28 mètres de diamètre, est capable de se positionner sur

une source en moins d'une minute ! « Jusqu'à maintenant, la contrepartie gamma des ondes gravitationnelles n'était pas vraiment la priorité de Hess⁴, avoue Fabian Schüssler, chercheur Irfu/CEA et membre

de la collaboration internationale qui pilote l'instrument. *Nous allons sans doute surveiller un peu plus les alertes émises par les expériences Ligo/Virgo.* » C'est surtout le successeur de Hess, CTA⁵, dont le

Maintenant que nous savons que les ondes gravitationnelles sont réelles, SVOM est encore plus légitime !

Bertrand Cordier, de l'Irfu/CEA.



Satellite SVOM.

CEA réalise plusieurs équipements (caméras, miroirs, chaîne d'analyse des données...), qui devrait participer pleinement à cette recherche. Il sera constitué de plusieurs dizaines de télescopes avec des miroirs de 4 à 23 m de diamètre, répartis sur les deux hémisphères de la planète et capables, comme Hess II, de se positionner très rapidement sur la source des ondes. « Une nouvelle fenêtre sur l'univers le plus violent vient de s'ouvrir, conclut Fabian Schüssler. Nous pouvons déjà tirer des informations très précieuses des ondes gravitationnelles elles-mêmes. Imaginez tout ce que nous pourrions apprendre lorsque nous verrons aussi leur contrepartie lumineuse ! » ♦

Le neutrino, l'autre messager

Les ondes gravitationnelles sont des rides qui se propagent dans l'espace-temps. Produites par des événements cataclysmiques, elles peuvent aussi s'accompagner d'ondes électromagnétiques, des photons gamma, X ou visibles. Une autre particule pourrait aussi leur être associée : le neutrino.

À condition, là encore, que de la matière soit impliquée (le neutrino est produit lorsque des photons frappent des particules de matière, les hadrons). Prédit en 1930, découvert en 1956, le neutrino a la particularité d'interagir très faiblement avec la matière. Autant dire que son étude n'est pas une mince affaire. L'observatoire Antarès, installé à 2500 mètres de profondeur dans la Méditerranée, au large de Toulon, est dédié à la détection de cette particule insaisissable. « Lorsque l'onde gravitationnelle a été captée, nous nous sommes aussitôt plongés dans les données enregistrées par Antarès, raconte Fabian Schüssler, qui participe également à l'expérience. Comme prévu dans le cas de la coalescence de deux trous noirs, nous n'avons pas observé de flux de neutrinos plus intense. » Il n'empêche, les observatoires de neutrinos Antarès et IceCube (pôle Sud) – et plus tard Km3Net (Méditerranée) – sont désormais aussi en alerte.

Le graviton, graal ultime

La physique quantique repose sur le principe de dualité qui associe à chaque type d'onde une particule élémentaire. La confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles relance ainsi la quête de la particule qui leur est associée : l'insaisissable graviton.

La Terre tourne autour du Soleil, la Lune autour de la Terre et... les pommes tombent des arbres. Tous ces phénomènes ont un point commun : la loi qui les gouverne, à savoir la gravitation décrite en 1686 par Isaac Newton¹. Plus de deux siècles plus tard, Albert Einstein développa une théorie plus large de la gravitation avec la relativité générale et les modifications de l'espace-temps par les masses ; théorie qui trouve aujourd'hui une formidable confirmation avec la détection des ondes gravitationnelles.

Seulement voilà, cela ne suffit pas. Les physiciens sont toujours incapables d'accorder cette théorie de la gravitation avec les **interactions fondamentales** testées avec précision, par exemple dans les collisionneurs de particules². Aussi, afin de tenter d'unifier la gravitation avec ces autres interactions, une nouvelle particule a été inventée : le graviton. « Il est à la gravité ce que le photon est à la force électromagnétique : un vecteur de la force d'attraction », explique Pierre Vanhove de l'IphT/CEA

Maintenant que les ondes gravitationnelles sont devenues réalité, et selon le principe quantique de dualité « onde-corpuscule », le graviton peut-il être observé ? « C'est une nécessité : nous pouvons faire l'hypothèse mathématique de son existence et décrire les phénomènes classiques ou quantiques avec lui, mais il faut aller plus loin et lui donner un sens réel, estime Pierre Vanhove. Ça ne sera pas facile car nous pensons que sa nature quantique n'interagit pas avec la matière de la même façon que le photon peut le faire. » Mais comme le remarque le physicien, au début du XX^e siècle, personne n'imaginait pouvoir piéger et manipuler des photons uniques, ce que font maintenant les physiciens. Aujourd'hui, la détection des ondes gravitationnelles fournit déjà une limite supérieure de la masse du graviton et on espère obtenir d'autres contraintes dans le futur. Le détecteur de graviton pourrait donc voir le jour et ainsi confirmer la gravité quantique, réconciliant les théories classiques et modernes de la physique pour dessiner un tableau cohérent et complet des forces qui régissent l'Univers. ♦

Notes :

1. Dans son célèbre *Principia* dans lequel il établit les équations mathématiques de la mécanique classique.

2. Voir *L'élégante traque du boson de Higgs*, hors-série décembre 2013 *Les Défis du CEA*.

Interactions fondamentales

Interaction électromagnétique, interaction nucléaire faible et interaction nucléaire forte régissant les phénomènes physiques de l'Univers.

Télécommunications

Futures antennes 5 G

Une équipe du **Leti** réduit de moitié l'épaisseur d'antennes pour les communications satellite et les futurs points d'accès des réseaux 5G. En remplaçant leur source focale unique par un réseau focal de 4 sources, la taille de ces antennes « à réseau transmetteur avec dépointage de faisceaux » est, à 30 GHz, de 10 x 10 x 3 cm. Et les performances sont à l'état de l'art en termes d'efficacité, bande passante, coût de fabrication, reconfiguration. *Mina News*

Photonique sur silicium

Nouveau débit record

Le **Leti**, Alcatel-Lucent et le III-V Lab triplent le débit d'un prototype de commutateur de données. Pour 128 ou 256 Gb/s, ils passent d'un système transmissif à un « réflectif » : les signaux lumineux véhiculés par 16 voies optiques rencontrent des miroirs, repartent en sens inverse, passant ainsi à deux reprises dans un atténuateur optique. Le dispositif intégré sur 3 mm² de silicium avec un seul multiplexeur intéressera les centraux de télécommunications. *Mina News*

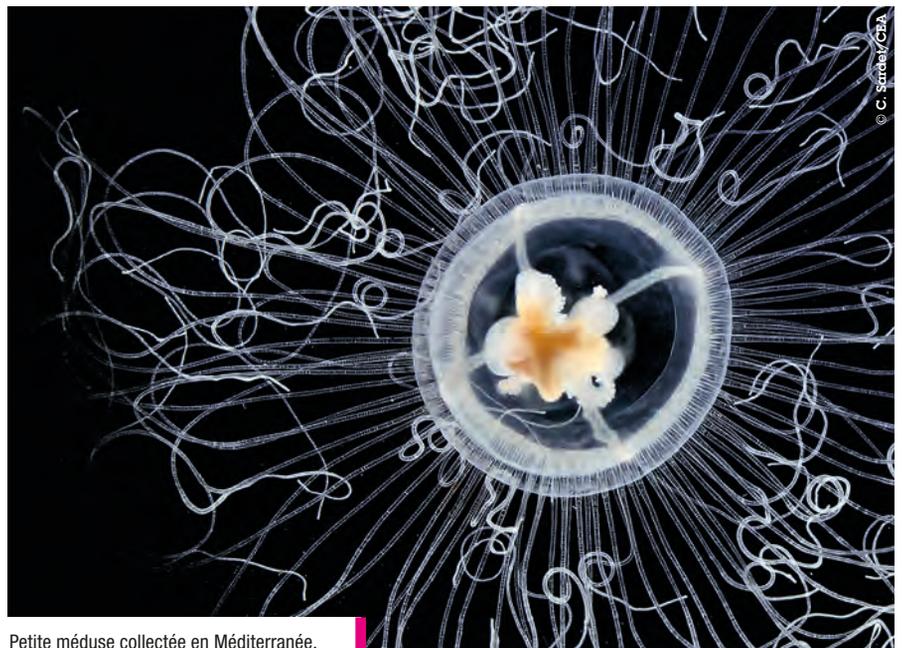
Métrie

Collaboration prospère du Leti et du MIT

Après avoir livré de premiers micro-résonateurs suspendus au MIT en 2014, le **Leti** récidive avec une nouvelle génération de composants. Toujours précis au femtogramme, ils sont dotés cette fois d'un réseau de capteurs pour accroître la cadence d'analyse. Aux États-Unis, ils sont utilisés en hôpital pour de la métrie de cellules tumorales sur des échantillons biologiques de patients. Fort de cette réussite, le MIT a passé une troisième commande. *Mina News*

WWW

minanews.org



Petite méduse collectée en Méditerranée.

Cycle du carbone

Un réseau social planctonique qui régule le climat...

Puits de carbone

Réservoir, naturel ou artificiel, qui absorbe le carbone de l'atmosphère, contribuant à en diminuer la quantité et à maintenir l'équilibre du cycle du carbone.

Puits de carbone principal de la planète, l'océan le doit à deux mécanismes. L'un, physique, entraîne les eaux de surface chargées en CO₂ dissous vers les couches profondes ; l'autre, biologique, fixe ce gaz à effet de serre dans les tissus des organismes ou dans les coquilles calcaires. Ce processus de pompe biologique fait intervenir le plancton, sans que son rôle soit clairement identifié.

Grâce aux milliers d'échantillons de Tara Océans¹, en cours d'analyse notamment par des chercheurs de l'IG de CEA, le mystère se lève peu à peu. Une étude multipartenaires² décrit ainsi le premier « réseau social planctonique » d'export de carbone dans les régions océaniques pauvres en nutriments (70 % des océans). Si de nombreux acteurs étaient déjà connus (algues photosynthétiques – diatomées, crevettes microscopiques – copépodes) ; d'autres sont largement sous-estimés, comme les parasites unicellulaires, cyanobactéries et virus. L'analyse de leurs gènes a permis d'établir que leur abondance relative prédit une fraction significative de la variabilité de l'export de carbone vers les profondeurs océaniques. Notamment parce qu'ils favorisent la dégradation et la sédimentation de la matière organique.

Restent à connaître la structure des réseaux et la fonction exacte des gènes de ces bactéries et virus pour mieux appréhender l'influence des espèces planctoniques sur le cycle du carbone et sur la régulation du climat. AG

Notes :

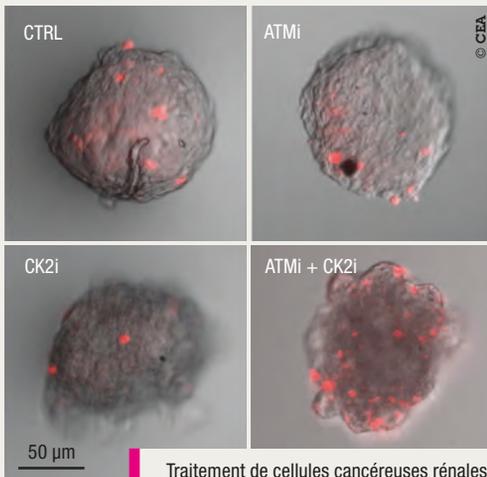
1. Périphe mondial sur les mers de 2009 à 2013.

2. CNRS, IPMC, Université de Nantes, VIB, EMBL, CEA.

Biosciences & biotechnologies

Vers un nouveau cocktail contre le cancer du rein

Une équipe du **Big** de CEA s'attaque au cancer du rein en s'inspirant des récentes thérapies ciblées contre le dérèglement des **kinases** ; thérapies pour lesquelles beaucoup de patients développent des résistances. Les chercheurs ont prospecté dans une chimiobanque pour créer des combinaisons de molécules inhibant une majorité de kinases potentiellement dérégulées. Et l'une d'entre elles, composée d'inhibiteurs chimiques ciblant les kinases CK2 et ATM¹, s'est révélée particulièrement performante. Testé avec succès sur des cellules cancéreuses rénales humaines cultivées en 3D, puis validé sur des modèles rongeurs, le nouveau cocktail fait l'objet d'un dépôt de brevet. AG



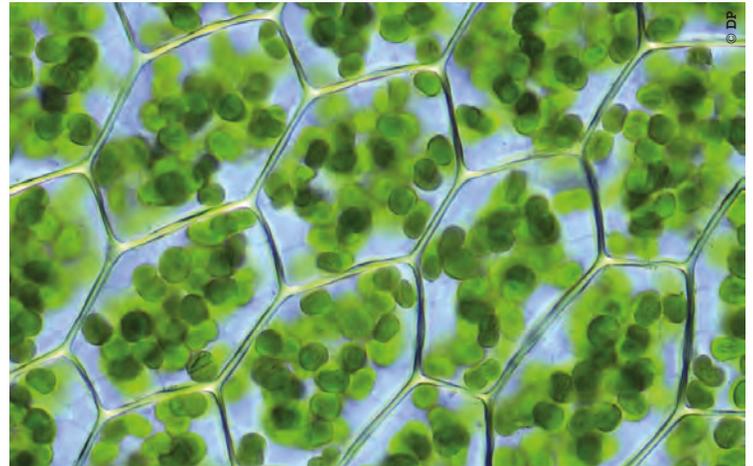
Traitement de cellules cancéreuses rénales.

Kinase

Enzyme catalysant les réactions de phosphorylation (transfert d'un groupe phosphate à une protéine ou petite molécule).

Note :

1. *Ataxia Telengectasia Mutated Kinase.*



Biosciences

L'héritage bactérien de la photosynthèse

Il résulte de l'alliance, il y a un milliard d'années, d'une bactérie et d'un organisme unicellulaire eucaryote, ancêtre commun des animaux et des plantes. Le chloroplaste est le siège de la photosynthèse. Il contient une voie de signalisation, peu étudiée, qui dépend d'une molécule active dans la réponse au stress chez les bactéries. En utilisant la génétique pour moduler la quantité de cette molécule¹, une collaboration² dévoile qu'elle freine l'activité du chloroplaste. « *Nous montrons également que cette voie de signalisation bactérienne est au cœur d'un dialogue entre le chloroplaste et le noyau cellulaire qui régule la croissance et le développement de la plante* » indique Christophe Robaglia de l'institut **Biam** de CEA.

La compréhension de ce phénomène permettrait de développer des stratégies de protection des cultures face aux changements climatiques ou d'optimiser la photosynthèse pour générer des biocarburants et autres produits de valeur. AG

Notes :

1. *Guanosine tétraphosphate.*
2. CEA, CNRS, Université d'Aix-Marseille.

Nanomatériaux

Expirez et le diagnostic sera fait !

La tuberculose tue chaque année près de deux millions de personnes, surtout dans les pays en voie de développement, faute de diagnostic rapide ou efficace. Le défi est de trouver une approche d'analyse plus simple et moins coûteuse que la méthode d'amplification de l'ADN recommandée par l'OMS¹. Des équipes de l'**Iramis** de CEA et de Biomérieux² proposent une stratégie avec des capteurs nanoporeux synthétisés *via* un **procédé sol-gel**.

L'idée est de détecter de faibles teneurs d'acide nicotinique (marqueur de la tuberculose active) dans un condensat d'haleine, de salive ou d'urine. Ainsi, un complexe de nitrate de terbium, dont la luminescence peut être exaltée par certains ligands organiques comme l'acide nicotinique, a été choisi comme sonde. Or, dans les fluides biologiques, ce marqueur est « parasité » par d'autres composés volatils. Les chercheurs ont décidé d'exploiter cette différence de volatilité pour concevoir un capteur. Celui-ci piège les interférents (900 à 480 000 fois plus volatils que l'acide nicotinique) dans des matériaux nanoporeux, afin de recouvrer la luminescence des complexes de terbium, et ainsi l'acide nicotinique présent dans le condensat d'haleine. AG

Notes :

1. Organisation mondiale de la santé.
2. Projet FUI Covidis.

Procédé sol-gel

Moyen de production de matériaux par polycondensation en voie humide.

Réalité augmentée

Des lunettes pour voir le virtuel



Superposer une information virtuelle sur un environnement réel est l'enjeu de la réalité augmentée (RA). Les lunettes semi-transparentes dotées d'une caméra restent à ce jour l'interface idéale, en laissant libres les mains de l'utilisateur. Pour avoir une localisation en temps réel des lunettes par rapport à l'environnement, et ainsi aligner parfaitement les données virtuelles sur le réel, l'institut **List** de CEA Tech propose un calibrage caméra/données innovant. Ces lunettes s'ajoutent ainsi aux tablettes et projecteurs que fournit déjà Diota, start-up du List spécialisée dans la RA pour l'industrie. AG

Cycle du carbone

Souffler le sec et l'humide

Parce que la végétation absorbe le dioxyde de carbone, la biosphère terrestre est un puits de carbone. Mais comment expliquer la baisse de son activité en Europe lors de la dernière décennie, alors qu'elle est en hausse actuellement ? La circulation atmosphérique régionale est mise en cause par une étude internationale impliquant le **LSCE**. Précisément, la variabilité de deux gradients de pression atmosphérique nord-sud en Atlantique Nord, *North-Atlantic Oscillation*, entre les Açores et l'Irlande, et *East-Atlantic Pattern*, plus au sud. Lorsque ces gradients sont forts, les flux d'ouest sont renforcés et décalés vers l'Europe du Nord : il fait plus sec sur les latitudes moyennes et basses de l'Europe, ce qui défavorise la croissance de la végétation et donc les puits de carbone associés. Lorsqu'ils sont faibles, les flux d'ouest passent sur les latitudes moyennes et sud de l'Europe : les hivers sont plutôt humides ce qui est bénéfique à la végétation et donc à l'absorption du carbone. AG



LA PHYSIQUE QUANTIQUE, VOUS CONNAISSEZ ?

Dans l'infiniment petit comme dans l'infiniment grand, la physique quantique est partout ! Pour autant, elle reste entourée d'une aura d'incompréhension...

Au fil de cette bande dessinée, suivez les aventures de Bob et de son chien Rick partis résoudre le mystère du monde quantique. Une aventure onirique rythmée de rencontres avec des physiciens de génie qui ont su déchiffrer les lois étranges de cet univers à l'échelle atomique : Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Ewin Schrödinger... L'étrangeté du monde quantique se dévoile alors petit à petit au lecteur et invite à jeter un œil radicalement nouveau sur notre réalité. Il paraît même, à en croire un jeune physicien américain, qu'il faudrait plutôt parler de « réalités » et que celles-ci se superposeraient en évoluant « quasiment indépendamment les unes des autres ». Votre vision du réel sera-t-elle changée à tout jamais ?

Le mystère du monde quantique ; Thibault Damour et Mathieu Burniat
Éditions Dargaud
19,99 €



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'HISTOIRE DE L'HUMANITÉ À TRAVERS DES INVENTIONS



Il y a deux millions et demi d'années, les hommes utilisaient les premiers outils en pierre. Depuis, ils n'ont cessé de déborder d'inventivité pour améliorer leur quotidien, leur santé et mieux communiquer. De l'apparition du langage à la révolution numérique, en passant par le dentifrice, le vaccin, la photographie ou encore l'ampoule, cinquante inventions fascinantes sont racontées et illustrées.

50 inventions qui ont fait le monde.
Philippe Nessmann.

Éditions Flammarion Jeunesse. 15 €

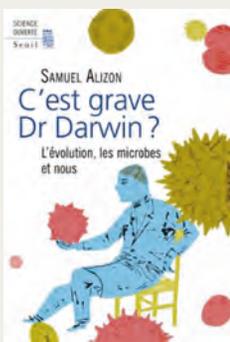
DES MERVEILLES À VOIR DANS SA VIE



Cet ouvrage propose d'explorer l'Univers et d'admirer les splendeurs du cosmos à travers 101 astres et phénomènes célestes ! Ces merveilles sont présentées selon quatre grandes catégories : le système solaire ; les constellations et les étoiles ; la voie lactée et ses trésors ; les autres galaxies. Avec à chaque fois un petit paragraphe « Comment la voir ? » décrivant le meilleur moyen de les observer.

101 merveilles du ciel. Emmanuel Baudouin
Éditions Dunod. 19,90 €

L'ÉVOLUTION, LES MICROBES ET NOUS



À la jonction de la théorie de l'évolution et de la pensée médicale se développe depuis peu la « médecine darwinienne ». Évolutionniste, celle-ci aide à comprendre l'apparition et l'évolution des maladies infectieuses, la perte d'efficacité de certains antibiotiques, l'influence des modes de vie et des politiques de santé publique sur l'évolution des agents pathogènes... Un des exemples les plus remarquables d'évolution rapide.

C'est grave Dr Darwin ? Samuel Alizon.

Éditions Broché. 20 €



Découverte

Les ondes gravitationnelles

Issue de la fusion de deux trous noirs, une onde se propageant depuis plus d'un milliard d'années a traversé la Terre et chacun de nous le 14 septembre 2015. Nous avons ainsi été comprimés et dilatés par une déformation spatio-temporelle d'une quantité infime qui a secoué nos protons d'un millième de leur taille, soit 0,0000000000000000001 m !

Pour en savoir davantage sur ce phénomène et la découverte des ondes gravitationnelles, venez consulter la page CEA qui compile quelques articles, conférences et interviews sur le sujet.

Il est à noter que les physiciens CEA de l'Irfu ne sont pas impliqués dans la collaboration Ligo-Virgo à l'origine de la détection de ces ondes. Mais ils scrutent l'Univers violent grâce à d'autres « messagers », par exemple les rayons gamma ou les neutrinos qui pourraient être associés à la fusion de trous noirs ou d'étoiles à neutrons. Tout est dit dans le dossier de ce numéro des *Défis du CEA*.

<http://bit.ly/230rsgt>



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 : Mathieu Grousson, Fabrice Demarthon, Vahé ter Minassian et Mina News | Comité éditorial Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Hélène Bulet, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi et Isabelle Dellis | Iconographie Micheline Bayard | Infographie Fabrice Mathé | Photo de couverture Max Planck Institute for Gravitational Physics | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation www.grouperougevil.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.

Objet de fascination,
d'observations,
de questionnements,
Mars est un lieu
d'exploration sans
pareil... Découvrez
la « planète rouge »
et rencontrez les robots
qui s'y sont posés.

explorez MARS

Palais
DÉCOUVERTE

EXPOSITION jusqu'au 28 août 2016

© Champs-Élysées Clemenceau et Franklin Roosevelt

En partenariat avec

