

# les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

222  
novembre 2017

TOUT  
S'EXPLIQUE

Supplément détachable  
sur les ondes  
gravitationnelles

02

## L'INTERVIEW

◆ Gaël de Paëpe repousse les limites de la RMN-DPN avec son projet ERC ◆

04

## ACTUALITÉ

◆ Deux lauréates CEA des Bourses L'Oréal/Unesco ◆ Chaîne cryogénique pour mission spatiale ◆ Tridimeo, 200<sup>e</sup> start-up du CEA ◆ La représentation opérationnelle du CEA à Tunis ◆

06

## SUR LE VIF

◆ Nobel de chimie : le vivant vitrifié sous l'œil de la cryomicroscopie électronique ◆ Ondes gravitationnelles : l'affaire devient lumineuse ◆

09

## LE POINT SUR

◆ Le Cenalt ◆

20

## SCIENCES EN BREF

◆ Tumeurs démasquées au premier coup d'œil ◆ Un micro-écran d'une résolution exceptionnelle ◆ Le 316LN résiste à l'épreuve de la fabrication additive ◆ Les super-antioxydants du romarin ◆ Dans une norme internationale ◆ Course au Qubit ◆ Décryptage d'un légionnaire qui envahit l'Afrique ◆

23

## KIOSQUE



12

DOSSIER

Systèmes cyberphysiques

# Une révolution industrielle en marche

**GAËL DE PAËPE,**

Ingénieur au CEA-Inac



© Christophe Levet

## Caractérisation haute résolution de la matière en RMN-PDN

La caractérisation à l'échelle atomique de la matière repose notamment sur la résonance magnétique nucléaire (RMN). Cette technique connaît des avancées remarquables, mais de nombreux verrous demeurent pour en repousser les limites. C'est tout l'enjeu du projet ERC que mène Gaël De Paëpe depuis le CEA-Inac, avec plusieurs brevets à la clé, des perspectives de transfert industriel, et des expériences qui le conduisent des matériaux pour l'énergie jusqu'aux amas de fibres amyloïdes propres à la maladie d'Alzheimer.

Propos recueillis par Aude Ganier

### Comment définir la résonance magnétique nucléaire (RMN) ?

La RMN repose sur le même principe que celui de l'IRM (imagerie par résonance magnétique) mais son objet d'étude est un échantillon de matière (matériau, protéines...) plutôt qu'un patient. Dans les deux cas, les spins des noyaux des atomes

interagissent avec un champ magnétique intense. Soumis à des ondes électromagnétiques précises, ces noyaux sont capables d'absorber de l'énergie (c'est la résonance). Le retour à leur état d'équilibre peut être détecté via le spectromètre RMN. Les signaux enregistrés (spectres), sont alors utilisés pour remonter à des informations structurales à l'échelle atomique. Il s'agit *in fine* d'une technique de caractérisation haute **résolution** dont les progrès permettent aujourd'hui de renseigner sur la structuration 3D de la matière.

### La « polarisation dynamique nucléaire » (PDN), inventée dans les années 1950, est actuellement en train de révolutionner l'impact de la RMN en phase solide. De quoi s'agit-il ?

Cette technique permet d'augmenter la **sensibilité** d'une expérience de RMN solide par plusieurs ordres de grandeur. Elle consiste à « hyperpolariser » les spins nucléaires et donc à rendre leur détection beaucoup plus sensible : on y parvient en leur transférant la polarisation (aimantation) de spins électroniques, introduits en faible quantité dans l'échantillon

grâce à des dopants, aussi appelés agents polarisants. Cette approche nécessite le développement d'une instrumentation innovante permettant une irradiation *in situ* des transitions électroniques et nucléaires, le tout sur un échantillon en rotation rapide sur lui-même... jusqu'à 100 000 tours par seconde (100 kHz) ! Cette rotation pneumatique, obtenue à l'aide d'un flux de gaz sous pression, est essentielle pour obtenir des conditions de haute résolution. Nous avons installé fin 2011 le troisième spectromètre PDN au monde, à un champ magnétique de 10 teslas (T). Depuis, plus d'une trentaine de laboratoires utilisent la PDN pour leur recherche, ce qui illustre l'essor de cette technique pour la RMN solide.

### Comment gagner davantage en sensibilité et en résolution ?

Les développements actuels visent à implémenter la technique à des champs magnétiques de plus en plus élevés, typiquement de 10 à 22 T et plus. La problématique est cependant la suivante : plus on augmente le champ magnétique, plus on doit faire tourner vite l'échantillon, et plus le gain de polarisation diminue tandis que la durée du transfert augmente...

**Cette problématique est au cœur de votre projet ERC...**

Oui, et pour y répondre, nous proposons de développer une approche complexe. Elle repose sur une instrumentation innovante couplée à une méthodologie avancée mixant théorie et modélisation numérique, permettant d'améliorer notre compréhension du phénomène d'hyperpolarisation. Ce positionnement quasi-unique nous permet d'être parmi les quelques laboratoires au monde à réaliser des expériences aussi sensibles à des températures bien plus basses que la limite commerciale actuelle d'environ 100 kelvins (K).

**Et vous avez de premiers résultats, à l'origine d'un dépôt de brevet et d'un possible transfert industriel...**

Nous avons déjà réalisé une preuve de concept d'expériences en rotation rapide jusqu'à 30 K. Elle a démontré d'importants gains en temps d'analyse (ramené d'une semaine à quelques heures), par rapport aux mêmes expériences sur des machines commerciales à 100 K. Ces développements intéressent d'ailleurs fortement un constructeur avec lequel nous envisageons effectivement un transfert industriel.

Par ailleurs, nous avons utilisé nos connaissances théoriques et nos outils de simulation pour concevoir et synthétiser une nouvelle famille d'agents polarisants particulièrement efficace pour des applications à très haut champ magnétique et basse température. Cela nous a permis de déposer un brevet très récemment. C'est un bon début, mais nous sommes encore loin de la limite théorique ! Notre objectif serait de pouvoir

atteindre des efficacités de transfert (hyperpolarisation) supérieures à 50 % en quelques secondes, pour un champ magnétique de 20 T et avec des fréquences de rotation de l'échantillon de 100 kHz ; ce qui est actuellement hors de portée. Pour comparaison, nous obtenons actuellement des efficacités PDN de 15 % en quelques secondes, à 10 T, et avec des rotations de 10 kHz.

**Quels secteurs applicatifs visez-vous ?**

Nous avons fait plusieurs contributions importantes dans le domaine de la RMN cristallographique, ou encore pour les problèmes d'étude de surfaces (e.g. catalyseurs) ou d'interfaces (e.g. biomatériaux). Par exemple, nous avons pu sonder de manière fine la structuration à la surface de silice fonctionnalisée et distinguer de manière claire condensation latérale (greffage) ou verticale (polymérisation). Actuellement, les gains en sensibilité nous permettent d'envisager l'étude d'amas fibrillaires, notamment impliqués dans de nombreuses maladies (Alzheimer, Parkinson, etc.) sans avoir recours au marquage isotopique (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N)... Des expériences préliminaires sont en cours dans notre laboratoire et ouvrent la perspective de pouvoir utiliser la RMN-PDN pour étudier des fibrilles extraites de patients.

**La RMN et la cryomicroscopie électronique, objet du prix Nobel de chimie 2017<sup>1</sup>, sont-elles complémentaires ?**

La RMN et la cryomicroscopie électronique reposent sur deux principes de fonctionnement très différents. Cette dernière a récemment amélioré

**BIO EXPRESS**

**2004**  
Thèse en RMN solide à l'ENS Lyon

**2004-2008**  
Post-doctorat au *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) – Boston

**2008**  
Obtention d'une « chaire d'Excellence » ANR  
Entrée au CEA-Inac

**2015**  
Obtention d'une bourse ERC *Consolidator*

considérablement la résolution des cartes de densité électronique, lui permettant de résoudre des structures de systèmes biologiques qui résistaient aux rayons X ou à la RMN. La combinaison de toutes ces techniques sera essentielle pour développer des outils

***Ce positionnement quasi-unique nous permet d'être parmi les quelques laboratoires au monde à réaliser des expériences aussi sensibles à des températures bien plus basses que la limite commerciale actuelle d'environ 100 kelvins (K).***

robustes capables de sonder la structure d'une macromolécule d'une part, mais aussi résoudre l'assemblage 3D de plus petites molécules, ainsi que sonder la surface ou l'interface de matériaux hybrides...

**Que diriez-vous aux chercheurs tentés par l'aventure ERC ?**

Je pense qu'il faut prendre le temps de bien réfléchir à son projet et de ne pas hésiter à repousser l'échéance de la constitution du dossier de candidature ; ce que j'ai fait à deux reprises et qui m'a finalement permis de bien mûrir ce projet. ♦

**LES CONTRATS ERC**

Les contrats de l'*European Research Council* (ERC) sont attribués depuis 2007 à des chercheurs du meilleur niveau international dont les projets sont en rupture par rapport à l'état de l'art.



**Notions clés**

**Résolution**

Capacité à distinguer plusieurs types de signaux ; dans le cas de la RMN, il s'agit de séparer les raies présentes dans les spectres RMN.

**Sensibilité**

Capacité à détecter un signal.

**Note :**

1. Voir les pages 6 et 7 de ce numéro.

Distinction

## Deux lauréates CEA des Bourses L'Oréal/Unesco

Au service de l'humanité ; les mystères de nos origines ; science connectée ; à la recherche de nouveaux traitements : voici les grandes thématiques des projets de recherche des trente lauréates des Bourses L'Oréal/Unesco. De quoi illustrer, à nouveau en 2017, la contribution essentielle de la science et des femmes aux grands enjeux de notre époque.

C'est en effet le moteur de la Fondation L'Oréal qui, en partenariat avec l'Académie des sciences et la Commission nationale française pour l'Unesco, attribue chaque année des bourses à trente doctorantes et post-doctorantes. Il s'agit de les accompagner dans leur carrière, de soutenir leurs recherches et de les mettre en lumière. Une initiative qui prend toute sa mesure alors que seuls 28 % des chercheurs sont des femmes, lesquelles ne représentent que 3 % des lauréats des prix Nobels. Les 30 nouvelles lauréates, sur 1 000 candidates, viennent ainsi rejoindre la communauté de 2 530 chercheuses récompensées à travers le monde par le programme *L'Oréal/Unesco Pour les femmes et la science*, créé en 1998 et présent dans plus de 48 pays. Parmi elles, Laure Cielsa post-doctorante spécialiste des galaxies au CEA-Irfu, et Eloïse Pariset, doctorante spécialisée en communication intercellulaire du CEA-Leti. AG



### Laure Cielsa *La décadence des galaxies*

Le projet vise à développer une méthode pour identifier les galaxies au moment où les processus empêchant la formation d'étoiles nouvelles sont en action.  
Objectif : proposer un schéma clair sur les mécanismes entraînant la mort des galaxies.

### Eloïse Pariset *Zoom sur la communication des cellules cancéreuses*

Il s'agit d'étudier la relation entre les propriétés structurales et mécaniques de vésicules et le caractère cancéreux de la cellule émettrice, grâce à une technique et un dispositif miniaturisé innovants.  
À la clé : diagnostiquer plus vite les cancers.



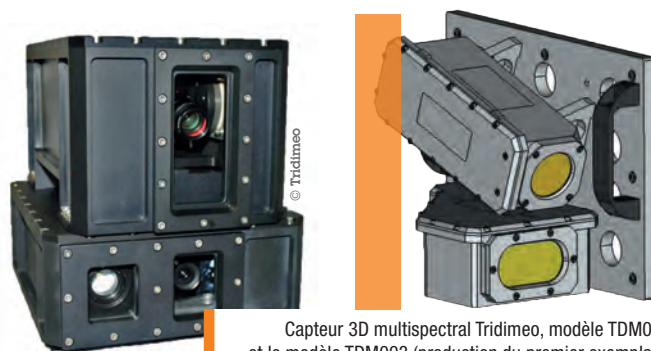
Inauguration

## Chaîne cryogénique pour mission spatiale

L'astrophysique moderne exige des sensibilités instrumentales toujours plus fines, fortement corrélées aux températures de fonctionnement des détecteurs des satellites. C'est tout l'enjeu de la cryogénie spatiale que de proposer de nouvelles technologies pour repousser les limites du froid.

Expert en la matière depuis des années<sup>1</sup>, le CEA-Inac se dote aujourd'hui d'une salle d'intégration à Grenoble, inaugurée en présence de représentants du Cnes et de l'Esa. Sur 100 mètres carrés, elle accueille une chaîne cryogénique prototype composée exclusivement d'éléments satisfaisant les contraintes spatiales (encombrement, résistance aux vibrations, durée de vie...). Mission ? Démontrer le refroidissement de détecteurs et la compatibilité de leur cahier des charges avec la sensibilité visée, notamment dans le cadre de deux projets impliquant le CEA : Athena, futur observatoire spatial dans le domaine des rayons X (Esa), et Spica-Safari, futur télescope spatial infrarouge moyen et lointain (Agence spatiale japonaise). Objectif : contribuer au développement de capteurs refroidis à une température de 50° mK (-272,65 °C), sans recours à un liquide cryogénique (cryostat), pour une sensibilité inégalée. AG

Note :  
1. Par exemple dans le cadre du satellite Herschel au début des années 2000.



Capteur 3D multispectral Tridimeo, modèle TDM002 et le modèle TDM003 (production du premier exemplaire prévue en novembre 2017).

Valorisation

## Tridimeo, 200<sup>e</sup> start-up du CEA

Elle conçoit et fabrique des caméras 3D industrielles de nouvelle génération, et elle développe des solutions logicielles de vision qui permettent aux usines d'automatiser des processus d'inspection ou de guidage robotique. Tridimeo, récemment essaimée de l'institut List, est la 200<sup>e</sup> start-up du CEA.

Avec une politique active d'accompagnement à la création d'entreprises auprès de ses chercheurs, ingénieurs et techniciens, le CEA compte en effet depuis 1978 200 start-up, dont plus de 70 % sont encore en activité. La dynamique s'est encore accrue ces dernières années avec 51 sociétés créées depuis 2006, dont 93 % sont encore en activité, un chiffre au-dessus de la moyenne. Certaines, comme Soitec et Sofradir, font aujourd'hui partie des fleurons de l'industrie française, toutes deux classées dans le top 10 des entreprises européennes ; d'autres sont particulièrement prometteuses comme Theranexus<sup>1</sup>, dans le domaine de la santé. AG

Note :  
1. Voir Les défis du CEA n° 221 - octobre 2017.

93 %

DES 51 STARTUPS DU CEA CRÉÉES DEPUIS 2006 SONT ENCORE EN ACTIVITÉ, UN CHIFFRE AU-DESSUS DE LA MOYENNE



Cryoréfrigérateur hybride 50° mK du CEA, conçu pour les projets Athéna et Spica-Safari.

Organisation

## La représentation opérationnelle du CEA à Tunis

C'est en marge du Haut Conseil franco-tunisien de Coopération<sup>1</sup>, co-présidé par le Premier ministre français Édouard Philippe et le Chef du gouvernement tunisien Youssef Chahed, que la représentation régionale opérationnelle du CEA à Tunis a été mise en place. Cette nouvelle structure du CEA, dirigée par le docteur Nidhal Ouerfeli, est compétente pour les pays du sud de la Méditerranée, le Moyen-Orient et l'Afrique. Elle aura pour vocation de renforcer les coopérations sur des sujets stratégiques (transitions énergétique et numérique, recherches technologique et fondamentale) et de faciliter leur suivi opérationnel ; notamment en couvrant les partenariats et projets du CEA établis à travers la plateforme technologique LinkLab créée en 2010 par le CEA et le groupe industriel tunisien Telnet Holding. AG

Note :  
1. Le 5 octobre 2017.

Étude du vivant

# Nobel de chimie : le vivant vitrifié sous l'œil de la cryomicroscopie électronique

Le jury du prix Nobel de chimie met cette année la cryomicroscopie électronique sur le devant de la scène. En récompensant Jacques Dubochet, Joachim Frank et Richard Henderson, il permet de s'intéresser à cette technologie prometteuse pour répondre aux questions majeures de santé publique. L'ESRF de Grenoble s'apprête d'ailleurs à inaugurer le microscope « Krios » qui profitera aux nombreux travaux du CEA au sein de l'Institut de biologie structurale (IBS)<sup>2</sup>. par Stéphanie Delage

**L**e prix Nobel 2017 de chimie est attribué à un trio de chercheurs ayant mis au point la cryomicroscopie électronique, technique capable d'étudier le vivant « dans son jus ». « Plus exactement, elle permet d'observer les molécules biologiques, figées dans leur structure naturelle, à l'aide d'un microscope électronique et à l'échelle atomique », précise Guy Schoehn, chercheur CNRS à l'IBS.

Tout commence en 1988 avec la volonté de développer la microscopie électronique, jusque-là dévolue aux matériaux, pour décrypter la structure d'objets biologiques. « Or, le vide poussé qui règne dans un microscope électronique et l'irradiation avec des électrons détruit tout échantillon biologique ! », indique le scientifique. En cause : l'eau

renfermée dans ses molécules, qui s'évapore dans le vide et qui, couplée à l'échauffement dû aux interactions avec les électrons, détruit la structure de l'échantillon. Jacques Dubochet met alors au point une technique de congélation ultrarapide qui transforme l'eau sous forme liquide en phase vitreuse. À l'opposé des cristaux de glace, l'eau en phase vitreuse est translucide vis-à-vis des électrons. Le premier obstacle est franchi.

## De l'eau vitreuse et une détection de haut vol

Toutefois, le pari n'est pas gagné : d'une part, même à basse température, les échantillons bougent sous l'effet du faisceau d'électrons ; d'autre part, la stabilité mécanique d'un microscope



Cryomicroscope électronique.

Structure du virus Zika reconstruite par cryomicroscopie électronique.

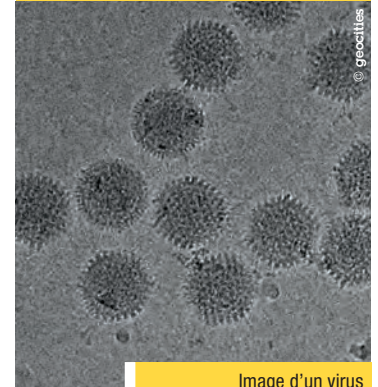
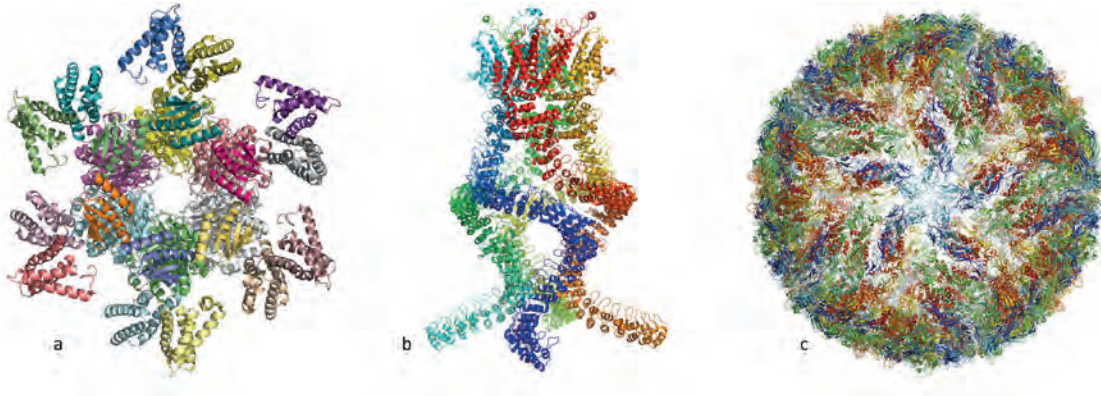


Image d'un virus dans de l'eau « vitreuse ».

électronique n'est pas parfaite. « Pour obtenir des images précises, non floues, il fallait donc développer des détecteurs beaucoup plus rapides et sensibles avec un très bon rapport signal/bruit. Ce que fit Richard Henderson en permettant de détecter et de compter chacun des électrons traversant l'échantillon, avec une fréquence de plusieurs centaines d'images par seconde », souligne Guy Schoehn. Quant au troisième chercheur lauréat du Nobel, Joachim Frank, il a contribué à passer des premières images très bruitées de cryomicroscopie électronique à la structure tridimensionnelle de l'objet d'origine.

sera inauguré le 10 novembre prochain à l'ESRF et sera accessible à tous les Européens, via des appels à projet similaires à ceux permettant d'obtenir du temps de faisceau de rayons X. « Le CEA y sera très impliqué et y détachera une personne. »

### Décrypter la rougeole, les adénovirus, les phages...

Les scientifiques de l'IBS et leurs partenaires continueront ainsi de profiter de cette technique qui se développe au fil des ans. « Nous travaillons par exemple avec des équipes du CEA sur

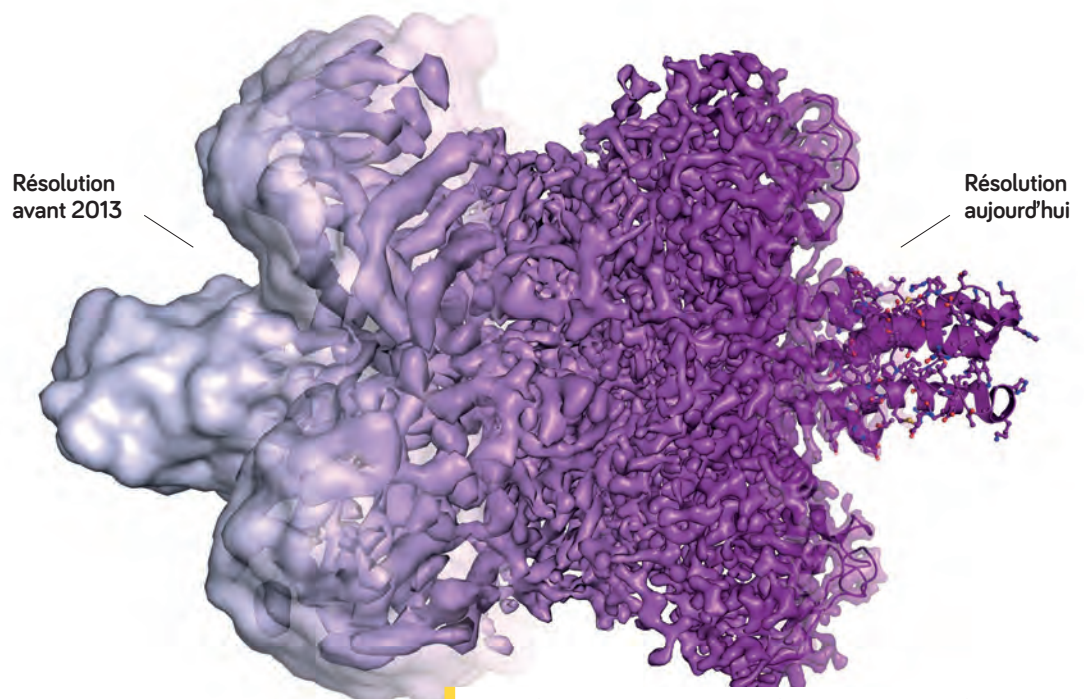
la structure de la protéine protégeant l'information génétique du virus de la rougeole. Nous nous intéressons également aux sécrétines, des systèmes transportant les toxines et les effecteurs libérés par les bactéries pour infecter leurs hôtes par exemple. Toujours avec le CEA, mon équipe étudie les bactériophages, alternatives thérapeutiques aux antibiotiques. On peut également citer l'étude des récepteurs à sérotonine... », détaille Guy Schoehn. La cryomicroscopie électronique s'avère donc un outil de choix pour trouver des réponses aux questions majeures de santé publique. ♦

#### Notes :

1. European Synchrotron Radiation Facility, instrument de recherche basé à Grenoble avec une gouvernance internationale de 22 pays partenaires dont 13 membres et 9 associés scientifiques.
2. Unité mixte de recherche CEA/CNRS/Université de Grenoble-Alpes.

### Un cryomicroscope de dernière génération inauguré à l'ESRF

Avec la cristallographie et la RMN (résonance magnétique nucléaire), la cryomicroscopie électronique fait depuis partie des techniques de pointe pour décrypter la structure du vivant. Ses avantages : elle ne nécessite pas de cristaux (transformation de l'échantillon) comme pour la première, et n'est pas limitée au niveau de la taille des molécules contrairement à la seconde. « Mais la France est un peu à la traîne et n'a pas, comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni en Europe, misé sur cette technique », regrette le chercheur de l'IBS. Seul un instrument de toute dernière génération (microscope Krios) est actuellement installé à Strasbourg, alors que l'Allemagne et le Royaume-Uni en comptent chacun plus d'une dizaine. Toutefois, un Krios



La résolution de la cryomicroscopie électronique s'est considérablement améliorée depuis 2013 permettant aujourd'hui de visualiser des protéines à l'échelle atomique.

Astrophysique

# Ondes gravitationnelles : l'affaire devient lumineuse!

La collaboration Ligo-Virgo a détecté pour la première fois une onde gravitationnelle résultant de la fusion de deux étoiles à neutrons. Et, fait nouveau, l'émission de lumière générée par cet événement a pu être observée par de nombreux instruments. Une belle découverte qui confirme l'importance du prix Nobel de physique 2017, décerné à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne pour leur observation en 2015 des toutes premières ondes gravitationnelles<sup>1</sup>.

par Aude Ganier

Note :  
1. Voir la  
rubrique *Tout  
s'explique* de  
ce numéro et  
le dossier du  
numéro 206.

**17** août 2017, 14 heures,  
41 minutes et 4 secondes :

l'expérience Ligo détecte depuis les États-Unis le passage d'une onde gravitationnelle (onde-G), sous la forme d'une infime déformation de l'espace-temps, bien plus petite que la taille d'un proton ( $10^{-19}$  mètre) ! En Italie, l'instrument de Virgo, lui, ne voit rien. Mais, sa non-observation permet à la collaboration de préciser le lieu d'émission de l'onde, dans une zone d'environ 30 deg<sup>2</sup> équivalent à 120 fois la taille de la Lune.

Au même moment (deux secondes après) et de manière indépendante, le satellite Fermi enregistre un sursaut gamma. De quoi convaincre Ligo-Virgo de lancer une alerte qui engage les astronomes du monde entier dans une course sans précédent pour traquer la **contrepartie lumineuse** et les neutrinos liés à cette onde-G. Pas moins de 70 observatoires, au sol ou depuis l'espace, se braquent sur une région d'une centaine de galaxies pour y chercher une nouvelle source...

## La traque aux contreparties lumineuses

Le satellite Intégral se plonge dans ses données et, 75 min après l'alerte, retrouve la présence d'un excès de rayons gamma : celui-ci provient de la bonne région et survient également deux secondes après l'onde-G... C'est finalement le petit télescope Swope de l'observatoire de Las Campanas (Chili) qui, 13 heures après, réussit le premier à localiser précisément une source transitoire lumineuse baptisée SSS17a, près de la galaxie NGC 4993. Cette information est confirmée dès le 18 août, depuis le télescope VLT (Chili) par des astrophysiciens du CEA-Irfu qui observent effectivement la nouvelle source SSS17a. De quoi s'agit-il ? Les analyses des données concluent à la fusion de deux objets, de 1,1 et 1,6 fois la masse du Soleil, ce qui correspond à deux étoiles à neutrons. Quant à la lumière émise, elle provient d'une partie de la matière des étoiles à neutrons éjectée lors de la fusion. ♦

## Onde gravitationnelle

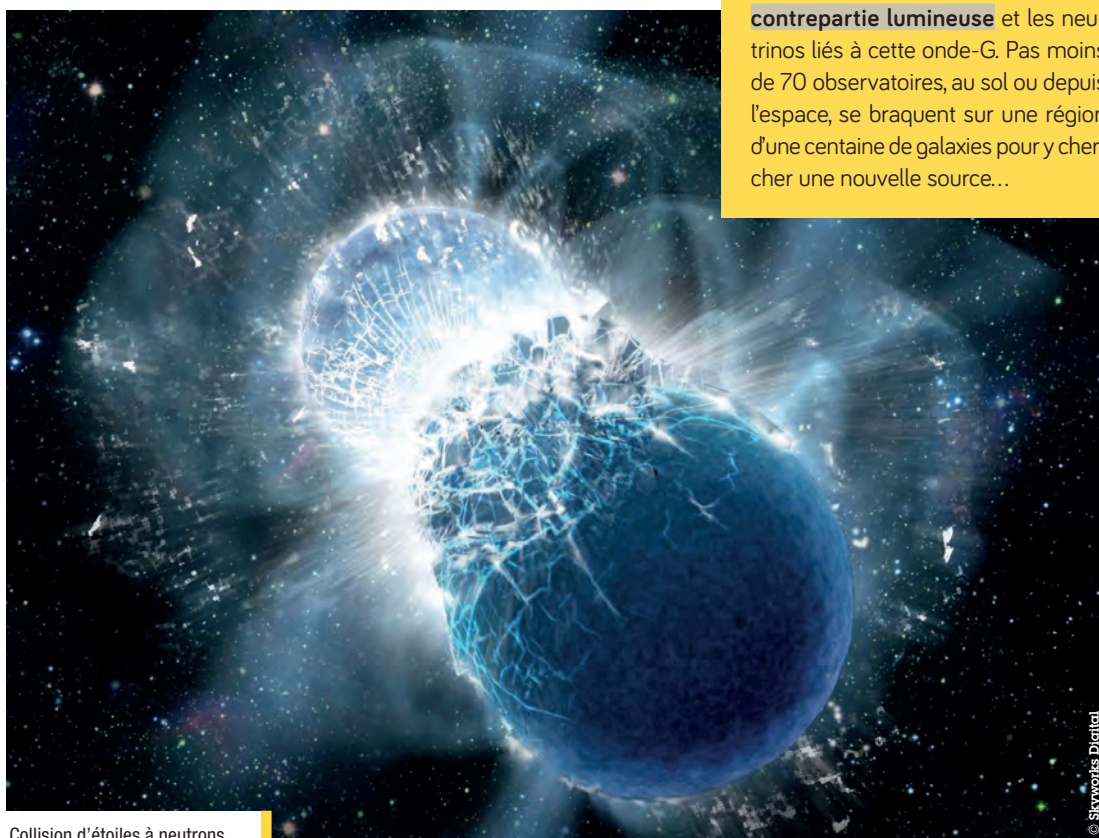
Ondulation de l'espace-temps sous l'effet de l'accélération de matière. Seules celles résultant d'événements cosmiques spectaculaires, comme la fusion entre deux trous noirs, sont détectables par les moyens actuels.

## Etoile à neutrons

Produit de l'effondrement d'une étoile massive, sous l'effet de sa propre gravité, lorsqu'elle a épuisé tout son combustible nucléaire.

## Contrepartie lumineuse

Ondes électromagnétiques (rayons gamma, X, UV voire lumière visible) associées à l'événement générant une onde gravitationnelle.



Collision d'étoiles à neutrons.

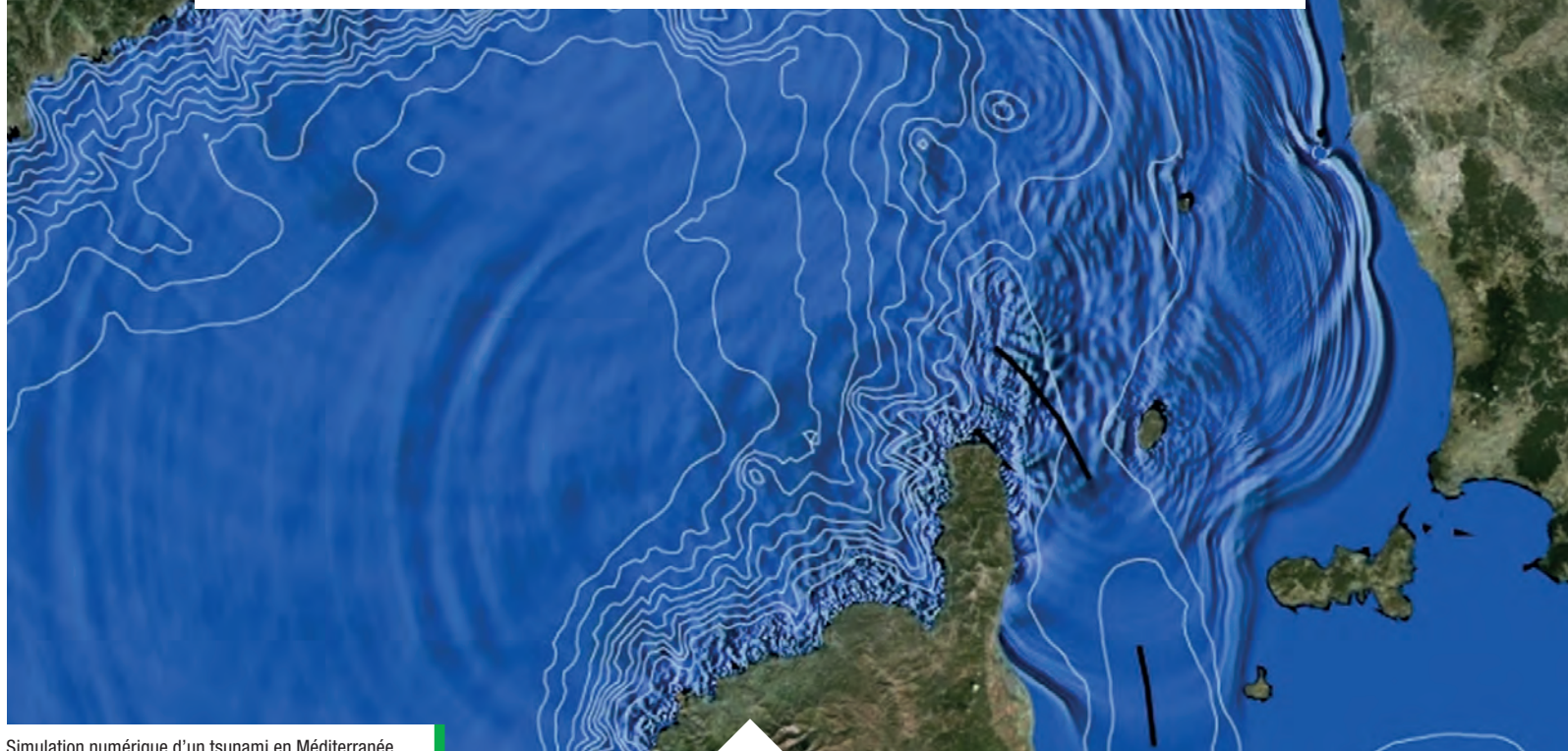
© Skyworks Digital



## 09 LE POINT SUR

Le Centre français d'alerte aux tsunamis, opéré par le CEA, surveille la Méditerranée occidentale et l'Atlantique nord-est 24 heures sur 24. Avec un impératif : alerter les autorités françaises et les pays de la zone en moins d'un quart d'heure, suite à un séisme potentiellement tsunamigène. Après cinq années de fonctionnement, l'heure est aux premiers bilans.

par Sylvie Rivière



Simulation numérique d'un tsunami en Méditerranée.

# Le Cenalt

**T**out le monde se souvient des effroyables tsunamis de 2004 et 2011 qui ont successivement touché les pays du nord de l'Océan Indien (Sumatra, Sri Lanka, sud de l'Inde et Thaïlande), et le Japon. Provoqués par des séismes de magnitude extrême – respectivement 9,2 et 9,0 sur l'échelle de Richter –, ils avaient balayé de vastes étendues côtières et provoqué plus de 230 000 morts pour l'un et près de 20 000 pour l'autre. D'autres bassins maritimes sont aussi menacés par ces phénomènes, comme, plus près de chez nous, la Méditerranée ou l'Atlantique nord. La Méditerranée est ainsi le siège de 9 % des tsunamis du globe ! Certes, la plupart de ces événements sont d'ampleur restreinte, mais le danger pour les populations côtières et les estivants est réel. Le dernier tsunami survenu dans la zone, provoqué en 2003 par un séisme de magnitude 6,7 localisé en mer au nord de l'Algérie, avait traversé la Méditerranée, détruisant au passage quelque 200 bateaux dans les Baléares, et occasionnant des dommages jusque dans une dizaine de ports français. Déferlant hors saison touristique, il n'avait fort heureusement pas fait de victimes. Le plus meurtrier reste cependant celui de Lisbonne en 1755. Causé par un séisme de magnitude estimée à 8,5 voire 9, il avait fait des dizaines de milliers de morts.

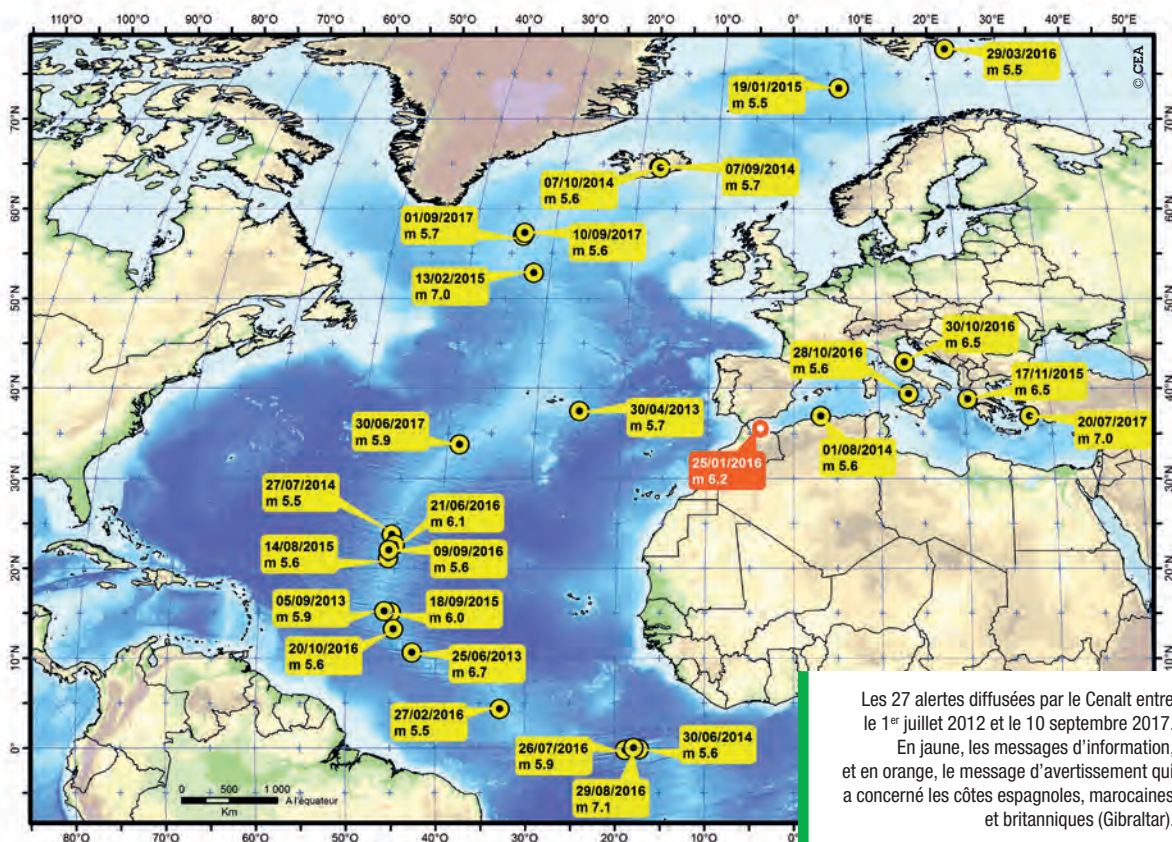
« Le tsunami catastrophique de 2004 avait démontré l'urgence de mettre en place des centres d'alerte, partout où cela était nécessaire, afin d'informer rapidement les populations, à l'image de ce qui existait déjà dans l'océan Pacifique », rappelle Pascal Roudil, responsable du Cenalt. L'initiative, pilotée par l'Unesco, est lancée dès 2005. Plusieurs pays – France, Italie, Grèce, Portugal et Turquie – se portent alors volontaires pour surveiller la zone nord-est Atlantique, la Méditerranée et les mers connectées (NEAM). Côté français, les ministères de l'Intérieur et de l'Écologie<sup>1</sup> confient la conception, la mise en place, puis la gestion du centre d'alerte, au CEA, en collaboration avec le Shom<sup>2</sup> et le CNRS. Le Cenalt, basé sur le centre CEA de Bruyères-le-Châtel, est désormais opérationnel depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2012. Il couvre la Méditerranée occidentale et l'Atlantique nord-est, une zone allant des côtes islandaises jusqu'à l'équateur à l'ouest, et à la botte de l'Italie à l'est.

### Diffuser une alerte en moins de quinze minutes

« L'objectif du Cenalt est de diffuser une alerte moins de quinze minutes après un séisme potentiellement générateur de tsunami survenant dans la zone NEAM », explique Pascal Roudil. Un délai imposé par la petite taille du ♦♦♦

#### Notes :

1. En 2009, il s'agissait des ministères de l'Intérieur, de l'Outre-mer, des Collectivités territoriales et de l'Immigration, et du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
2. Service hydrographique et océanographique de la marine.



Les 27 alertes diffusées par le Cenalt entre le 1<sup>er</sup> juillet 2012 et le 10 septembre 2017. En jaune, les messages d'information, et en orange, le message d'avertissement qui a concerné les côtes espagnoles, marocaines et britanniques (Gibraltar).

bassin méditerranéen. Un tsunami généré au large des côtes algériennes atteindrait en effet les côtes françaises en une heure et quart au maximum !

Pour relever ce défi, une équipe d'analystes assurent une surveillance 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Ils reçoivent en temps réel les informations émises par un large réseau de marégraphes et de sismographes. Les données sont automatiquement analysées par une batterie d'algorithmes de traitement automatiques spécialement mis au point pour le centre d'alerte. Compte tenu de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans la croûte terrestre, quelques minutes suffisent pour que les logiciels localisent l'événement, calculent sa magnitude ainsi que son potentiel tsunamigène, et déterminent le niveau d'alerte associé – jaune, orange ou rouge, selon l'ampleur de l'événement (voir encadré page 11). L'analyste de permanence dispose alors de quelques minutes supplémentaires pour vérifier ces informations en apportant

des corrections si nécessaire, décider de l'envoi ou non d'une alerte et en valider le contenu ! Typiquement, un message d'alerte indique les caractéristiques du séisme (heure, localisation, profondeur du foyer et magnitude) et le niveau d'alerte. En cas de tsunami attendu, il précise les zones potentiellement touchées par les vagues, avec les heures d'arrivées théoriques sur les côtes menacées.

Une fois l'alerte lancée, l'analyste doit encore confirmer ou infirmer le déclenchement du tsunami, grâce aux mesures du niveau de la mer transmises en temps réel par les marégraphes côtiers. « Si le tsunami est confirmé, l'analyste envoie un second message, en précisant ses caractéristiques : heures d'arrivée sur les différents points concernés du pourtour méditerranéen, amplitude, etc. », ajoute Pascal Roudil.

Les alertes sont transmises au Cogic, le Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises, qui les relaie aux préfets concernés et aux états-majors de zone, lesquels préviennent les communes, afin d'alerter au plus vite les populations concernées. « Nous informons dans le même temps les autres centres d'alerte nationaux et les "points focaux tsunami" de la zone NEAM, le Centre de coordination de la réaction d'urgence en Europe<sup>3</sup> ou encore la Commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco », précise François Schindelé, expert international et coordonnateur du Cenalt au niveau national.

### Une équipe rodée et entraînée en permanence

Évidemment, les séismes générateurs de tsunamis dans la zone surveillée par le Cenalt sont rares ! Pour être en permanence opérationnels, les analystes traitent

Note :  
3. ERCC à la Commission européenne.

## UN TSUNAMI, COMMENT ÇA MARCHE ?

Les tsunamis sont des événements provoqués par des séismes sous-marins se produisant à faible profondeur (moins de 100 km de profondeur) et possédant une magnitude d'au moins 6,0. Lors du séisme, le mouvement vertical de la surface de la croûte terrestre soulève brutalement la masse d'eau située juste au-dessus. Le tsunami se propage ensuite rapidement, jusqu'aux côtes. En Méditerranée occidentale, le risque de tsunami est pour l'essentiel lié aux grandes failles côtières et sous-marines situées entre Gibraltar et la Sicile, résultant de la remontée vers le nord de la plaque africaine.

systématiquement toute la sismicité de la France et de la zone euro-méditerranéenne. Depuis l'entrée en fonctionnement du centre, pas moins de 15 000 séismes ont ici été analysés. L'autre approche, complémentaire, consiste à s'entraîner au moyen de nombreux tests et exercices. Objectif : maintenir, valider et tester les procédures opérationnelles. Et le rythme est soutenu ! Exercices hebdomadaires internes au Cenalt, sur la base de scénarii de séismes et de tsunamis ; tests de communication mensuels visant à s'assurer du bon fonctionnement des moyens de communication à l'envoi et à la réception ; exercices mensuels avec le Cogic visant à tester et analyser les procédures d'alerte, mais aussi à sensibiliser et former le personnel de la Sécurité civile ; et enfin exercices de grande ampleur au cours desquels des messages d'alerte sur la base d'un scénario de séisme et tsunami sont diffusés à tous les destinataires de la zone NEAM.

**L'objectif du Cenalt est de diffuser une alerte moins de quinze minutes après un séisme potentiellement générateur de tsunami survenant dans la zone NEAM**

*Pascal Roudil, responsable du Cenalt*

### Une accréditation internationale

Cinq années après sa mise en service, quel est le bilan du fonctionnement du Cenalt ? « Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2012, 27 messages ont été envoyés aux destinataires de l'alerte. Si 26 d'entre eux concernaient des informations (niveau jaune), celui du 25 janvier 2016 était de niveau orange, avec un avertissement transmis aux pays proches de l'épicentre. Les marégraphes du sud de l'Espagne avaient d'ailleurs bien enregistré un tsunami de quelques centimètres », commente François Schindelé. Les très nombreux exercices réalisés depuis cinq ans ont permis à la fois d'améliorer les procédures – par exemple, en formalisant des échanges par visioconférences lors d'une crise pour être au plus près des besoins des services de secours – et de fluidifier le fonctionnement du centre. « Faire des exercices avec nos partenaires permet aux uns et aux autres de mieux se connaître, et cela nous rend plus efficaces », ajoute Pascal Roudil.

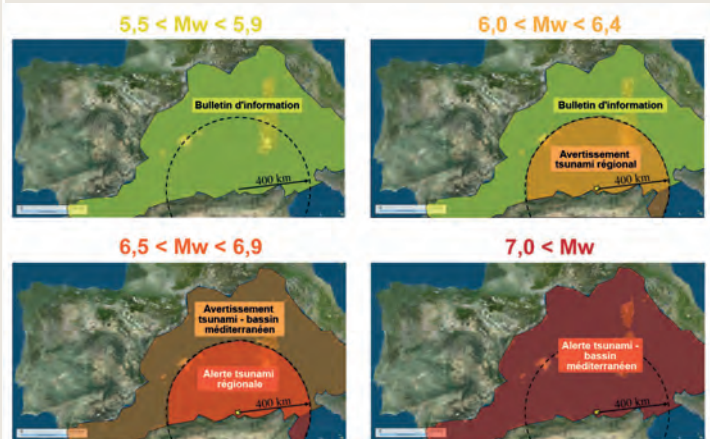


La salle d'analyses du Cenalt, à Bruyères-le-Châtel.

### LES NIVEAUX D'ALERTE

Trois niveaux d'alerte sont prévus selon l'impact tsunamigène des séismes :

- **Jaune/Information** : séisme important sans risque de tsunami ;
- **Orange/Avertissement** : vagues pouvant atteindre 50 cm au large ou 1 mètre sur les côtes ;
- **Rouge/Alerte** : vagues pouvant atteindre plus de 50 cm au large ou plus de 1 mètre sur les côtes.



### UNE RECONNAISSANCE D'UTILITÉ PUBLIQUE

En 2016, quatre années après la mise en service du Cenalt, le ministère de l'Intérieur et le ministère de la Transition écologique et solidaire ont reconnu l'activité du centre d'alerte comme mission de service public. L'alerte aux tsunamis fait désormais partie des missions du CEA.

Gage de la qualité du travail des équipes du CEA, le Cenalt a été accrédité en juin dernier par la Commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco, sur la base d'un ensemble de critères définis par un panel d'experts internationaux. C'est l'un des quatre centres d'alerte, sur les neuf en service sur la surface du globe, à avoir reçu ce label, avec ceux d'Italie, de la Grèce et de la Turquie. ♦



Marégraphe de Port Ferréol (commune des Issambres) installé par le Shom.



*Systèmes cyberphysiques*

# Une révolution industrielle en marche

**P.14**  
Systèmes cyberphysiques : la technologie est de retour

**P.15**  
Au-delà de la somme de leurs nombreuses technologies

**P.18**  
L'indispensable approche système

**P.19**  
Sûreté et sécurité en ligne de mire

Bordés de capteurs et d'intelligence embarquée, interconnectés entre eux et avec le monde physique, les systèmes cyberphysiques sont un des piliers de l'usine 4.0.

Véhicules autonomes, réseaux intelligents, les applications de ces systèmes conscients de leur environnement et agissant de leur propre initiative n'en sont encore qu'au stade embryonnaire... mais les possibilités offertes sont vertigineuses et soulèvent des questions cruciales en matière de sécurité et de sûreté.

Dans ces perspectives, le CEA développe avec ses partenaires académiques et industriels les briques technologiques qui permettront de les lever et d'accompagner ainsi la transition numérique de l'usine du futur.

*par Mathieu Grousson et Aude Ganier*

# Systemes cyberphysiques : la technologie est de retour

Présentés parfois comme le fondement technique de la 4<sup>e</sup> révolution industrielle, les systèmes cyberphysiques (CPS) vont permettre d'accompagner la mue numérique des entreprises. Une transition anticipée par les équipes du CEA, de concert avec leurs partenaires académiques et industriels.



*Ce qui me frappe, c'est le retour au premier plan de la technologie : dans l'aérospatial et les transports, les services, la santé, l'énergie... Dans tous les domaines de l'industrie, les plus grandes entreprises mondiales remettent en avant la technologie comme argument majeur*

Note:  
1. Chiffre d'affaires annuel français estimé à 200 milliards d'euros.

**Un CPS est un système (véhicule autonome, réseau énergétique, dispositif médical...) qui couple les fonctions électroniques et logicielles de ses composants (capter, traiter, transmettre, interpréter, rétroagir), pour analyser finement et en temps réel son état et son environnement, afin de gérer, sécuriser et optimiser ses performances**

Stéphane Siebert, directeur de CEA Tech



de leadership et investissent à nouveau dans des outils industriels », confie en janvier dernier le directeur de CEA Tech, Stéphane Siebert. Le CEA a vu juste depuis les années 2000, en orientant sa recherche technologique autour de trois transitions : numérique, énergétique et biotechnologique. Une vision confortée par le nouveau décret du CEA du 17 mars 2016, réaffirmant la mission de contribution à « la compétitivité de la France, au développement technologique et au transfert de connaissances, de compétences et de technologies vers l'industrie (...) »

## Un enjeu de souveraineté économique

Et l'un des enjeux de cette compétitivité passe par l'usine du futur qui, en plus de stimuler l'innovation, permettra de moderniser les outils de production. Pour cela, de nombreuses briques technologiques convergent vers un nouvel univers : celui des systèmes cyberphysiques, un terme communément admis sous l'acronyme CPS pour *CyberPhysical Systems*. « Concrètement, il s'agit d'un système (véhicule autonome, avion, train, réseau énergétique, dispositif médical) qui couple les fonctions électroniques et logicielles de ses composants (capter, traiter, transmettre, interpréter, rétroagir), pour analyser finement et en temps réel son état et celui de son environnement, afin de gérer, sécuriser et optimiser ses performances », explique Stéphane Siebert.

De fait, de nombreux secteurs industriels (automobile, énergie, aéronautique, ferroviaire, santé) sont concernés par les CPS qui représentent un levier certain de compétitivité. Et leur maîtrise devient un enjeu de souveraineté économique à en juger les marchés concernés<sup>1</sup> et leurs taux d'exportation. Mais, si le tissu industriel et académique français possède un très fort savoir-faire en la matière, il demeure que l'architecture profondément nouvelle et complexe des CPS nécessite des ruptures technologiques et de grandes capacités de transferts industriels.

## Pour une coordination nationale et européenne

Dans ce contexte, par ailleurs hautement concurrentiel à l'international, un groupe de travail réunissant des organismes de recherche publics (CEA et Inria), des industriels majeurs (EDF, Safran, Thales et Valeo) et des associations professionnelles (Embedded France et CapTronic), a réfléchi à une feuille de route nationale. Celle-ci a été soumise au ministre de l'Économie et des Finances, lors de sa visite à Grenoble en août dernier. Son objectif : permettre à l'ensemble de l'écosystème français (grandes entreprises, PME, y compris sous-traitants et clients) de relever les défis des CPS. Une ambition qui suppose d'investir dans l'avenir : « nous avons estimé à 40 millions d'euros par an le besoin de subvention sur la recherche pour les CPS ; il faut aider les start-up à croître, l'État pourrait doter un fonds dédié de 100 millions ; enfin, pour l'aide au déploiement de l'innovation par les grands groupes, le besoin de capitalisation est de l'ordre de 500 millions » avait alors annoncé l'Administrateur général adjoint du CEA, Christophe Gégout. ♦

# Au-delà de la somme de leurs nombreuses technologies



Le pilotage automatique d'un avion est l'un des premiers systèmes cyberphysiques (CPS).

Des véhicules totalement autonomes, capables de prendre la bonne décision quelles que soient les circonstances ; des réseaux qui optimisent la distribution d'énergie au gré d'une demande fluctuante et d'une production intermittente : telles sont les promesses des systèmes cyberphysiques (CPS). Un nouveau paradigme que les briques technologiques développées par le CEA, pour ou avec des industriels, permettent d'entrevoir.

#### Latence

Notion désignant les délais de transmission.

d'application : transport, usine du futur, énergie, santé... De quoi proposer une offre « globale ». Ce à quoi s'emploie désormais le CEA.

#### Un univers technologique en devenir

Une chose est sûre, les éléments de cette révolution en marche sont palpables : d'une part, avec l'Internet des objets (IoT) qui connecte la réalité à la toile numérique via une multitude de capteurs dans des domaines aussi variés que l'industrie, la santé, l'énergie ou la domotique ; d'autre part, avec l'intelligence embarquée qui permet par exemple des prouesses dans l'aéronautique mais également désormais dans l'automobile.

« Pour autant, il y a aujourd'hui de l'intelligence embarquée dans les voitures, mais celles-ci ne sont pas connectées entre elles, tout comme leur capacité à agir sans intervention humaine est limitée. Quant à l'IoT, il permet de connecter des objets, mais leur intelligence demeure réduite. Du reste, insuffisamment robustes et n'offrant que peu de garanties sur les temps de réponse, les connexions via les réseaux numériques se prêtent mal aux activités critiques », précise Jean-Noël Patillon, adjoint au directeur du List, institut de CEA Tech. Une vision partagée par Ahmed Jerraya : « il ne sera envisageable de connecter deux robots dans une usine, ou bien deux véhicules autonomes pour éviter une collision, qu'à la condition de disposer d'un lien fiable, haut débit et au temps de latence déterminé. De même, les intelligences embarquées devront voir leurs capacités démultipliées afin de dépasser le contrôle de simples boucles fermées entre des capteurs et des actionneurs ». Fort de ce diagnostic, et pas à pas, le CEA développe de nombreuses solutions, que ses partenariats industriels permettent d'ailleurs de valider. ♦♦♦

L'univers des systèmes cyberphysiques (CPS), peuplé de machines « conscientes » de leur environnement et agissant de leur propre initiative sur la réalité, n'existe encore qu'à l'état embryonnaire. Mais, comme le confirme Ahmed Jerraya, directeur scientifique à CEA Tech : « c'est la prochaine étape, celle où les intelligences artificielles aboliront la frontière entre le monde physique et les réseaux virtuels ». De là à voir l'avènement des CPS à brève échéance ? « Beaucoup de gens y pensent, mais on n'y est pas encore, admet le spécialiste. Aujourd'hui, on fait des systèmes cyberphysiques avec des moyens anciens. » Selon Ahmed Jerraya, au-delà du développement nécessaire de briques technologiques, il convient également de définir précisément les éléments communs à tous les CPS, quel que soit le domaine



Le composant Sigma Fusion du Leti fournit au système de pilotage automatique d'une voiture des données précises sur la position des obstacles et les espaces de sécurité.

### Fusionner des données complexes hétérogènes

Les CPS impliquent des objets connectés à leur environnement via une large palette de capteurs de positionnement, détection, mesures... Mais, pour que ces informations hétérogènes soient utilisables, encore faut-il pouvoir les trier, les synthétiser et les fusionner.

C'est ce que propose le composant numérique Sigma Fusion, développé par le Leti, institut de CEA Tech,

et présenté en janvier dernier au *Consumer Electronics Show (CES)* de Las Vegas. Capable d'interpréter de concert les signaux d'une caméra stéréoscopique et de deux lidars, il fournit au système de pilotage automatique d'une voiture des données précises sur la position des obstacles et les espaces de sécurité. Consommant un watt de puissance, compatible avec une large gamme de capteurs standards et 100 fois plus efficace que les systèmes actuels, il pourra aussi équiper des drones ou des dispositifs de surveillance, de secours et de sécurité. La fusion de données à une large échelle est également une nécessité. Dans le cadre de l'IoT, la plateforme *middle ware* Sensinact du Leti permet de réunir sur une seule interface des données aussi différentes que des températures, des luminosités ou un nombre de personnes présentes dans une pièce. L'intérêt ? La possibilité de développer facilement des applications à partir de données présentées dans un format unique. *Open source*, Sensinact a notamment été déployée expérimentalement dans plusieurs villes japonaises et européennes, elle le sera prochainement dans la station

de Chamrousse pour le suivi des activités hivernales des skieurs ; ceci, afin de faire la synthèse des données fournies par des capteurs urbains (circulation, météo, pollution, bruit, activités diverses...).

Plus évoluée, la plateforme *middle ware* Linc, également développée par le Leti, ne se contente pas de mettre au format des données de différentes natures. Mieux, elle garantit la cohérence des messages qui transitent à travers elle, même en cas de dysfonctionnement de segments d'un réseau. Ainsi, « elle est particulièrement adaptée aux activités critiques dans l'industrie ou les transports, par exemple pour suivre les états des navettes autonomes », explique Vincent Olive, chef de laboratoire au List. En phase de distribution par la start-up du Leti Bag-Era, Linc a déjà été utilisée pour le pilotage optimisé de la consommation d'énergie d'un bâtiment, en couplant l'analyse du fonctionnement du groupe chauffage/ventilation/climatisation avec le système de surveillance, la gestion d'un équipement d'analyses biologiques ou la surveillance d'ouvrages de génie civil.

### PRINCIPALES BRIQUES TECHNOLOGIQUES

- Composants intégrés & sécurisés
- Systèmes embarqués
- Micro-sources d'énergie
- Ingénierie logicielle et système
- Intelligence ambiante
- *Manufacturing* avancé
- Télécommunications & objets connectés
- Cybersécurité

### PRINCIPALES RUPTURES TECHNOLOGIQUES

- Apporter la puissance de calcul localement au cœur des systèmes
- Embarquer l'intelligence, notamment artificielle
- Maintenir la flexibilité, la réactivité et la sécurité du système
- Garantir la résilience de la connectivité en temps réel



**Une mise en réseaux intelligente, performante et fiable**

Qui dit traitement d'informations complexes, dit intelligence embarquée performante. À cet égard, le CEA développe des solutions multiples où se mêlent architecture des circuits, problématique énergétique, algorithmes : parmi elles, les processeurs multicœurs de la start-up Kalray fondés sur un important portefeuille de brevets du Leti et du List. Leur spécificité : une puce comprenant jusqu'à 1 024 cœurs travaillant en parallèle et, surtout, configurables à loisir en fonction des tâches à effectuer. « Cette possibilité unique permet par exemple de traiter simultanément des tâches critiques et d'autres ne nécessitant pas de temps de réponse garanti, précise Jean-Noël Patillon, avant d'ajouter : sur ce thème, nous collaborons notamment avec Safran ou Renault. »

À terme, les réseaux eux-mêmes devront garantir la synchronisation des informations et offrir des certitudes au niveau de la rapidité de leur délivrance. De fait, si on peut se satisfaire d'une latence indéterminée pour la recherche d'un billet d'avion au meilleur prix sur Internet, tel n'est pas le cas lorsqu'une information doit être transmise d'une rame de train à une autre pour une prise de décision mettant en cause la sécurité du trafic.

Précisément, le réseau des communications entre les différents éléments d'un CPS devra être résilient, tolérant aux pannes et reconfigurable à l'infini et en temps réel. C'est l'objet de la plateforme logicielle NEON du List qui ausculte un réseau en permanence pour connaître son état précis à chaque instant, et décider le cas échéant de sa

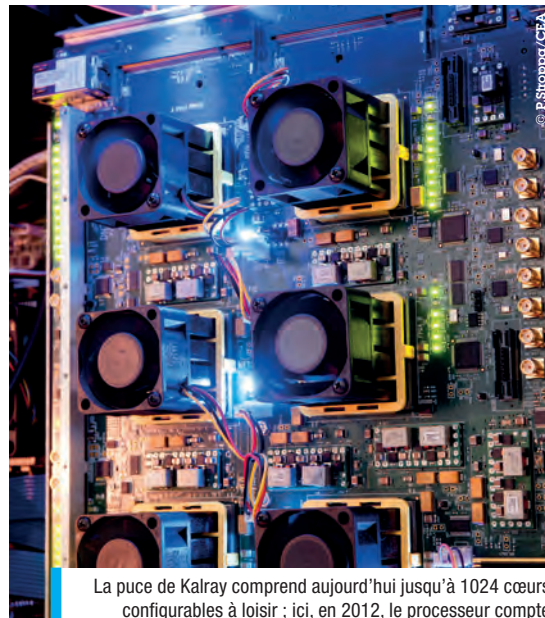
reconfiguration dans le but d'éviter toute rupture. De plus, elle adapte l'architecture et les caractéristiques d'un réseau au gré de besoins variables en rapidité, robustesse, sécurité ou optimisation énergétique. Déjà mise en œuvre dans le cadre de différentes collaborations pour la gestion de la criticité de réseaux privés dans l'industrie, les transports ou la sécurité, « NEON est amenée à jouer le rôle de véritable colonne vertébrale des CPS », commente Jean-Noël Patillon.

**Connectivité tous azimuts : l'enjeu de la 5G**

Reste que le traitement intelligent de données critiques n'a de sens que si les temps de latence suivent la cadence. En d'autres termes, des capteurs et logiciels, même localisés à différents endroits – d'une usine voire d'une ville – doivent pouvoir interagir en temps réel.

La connectivité haut débit et basse consommation est l'une des spécialités du Leti. Par exemple, son dispositif G-Link, présenté au CES (édition 2016), permet des transferts sans fil, à très haute vitesse de données, consommant 10 à 20 fois moins pour des débits de 5 Gb par seconde, à 60 GHz sur de très courtes distances. Les ingénieurs poursuivent d'ailleurs les développements pour des fréquences plus élevées (>100 GHz), avec des bandes passantes plus larges, permettant des débits entre 25 et 40 Gb par seconde et par liaison. Parallèlement, ils travaillent à de nouvelles antennes pour relever les défis de leur coût et de leur efficacité pour des distances de transferts excédant quelques dizaines de mètres.

Il s'agit ni plus ni moins de se préparer à une autre révolution, celle de la 5G qui



La puce de Kalray comprend aujourd'hui jusqu'à 1024 cœurs configurables à loisir ; ici, en 2012, le processeur compte 48 cœurs répartis sur six clusters interconnectés.

présentera des débits bien supérieurs, à l'échelle du multigigabits (contre la centaine de mégabits pour la 4G) et avec des temps de latence inférieurs à la milliseconde (contre 50 ms aujourd'hui). « Le déploiement de la 5G sera accéléré par des liaisons très haut débit

**Nous avons déjà transféré une technologie d'antenne compacte très haute fréquence à la société Radiall qui la propose à ses clients pour assurer cette flexibilité nouvelle, au cœur du réseau.**

Lionel Rudant, responsable marketing stratégique au Leti



entre les stations de base. Nous avons déjà transféré une technologie d'antenne compacte très haute fréquence à la société Radiall qui la propose à ses clients pour assurer cette flexibilité nouvelle, au cœur du réseau », indique Lionel Rudant, responsable marketing stratégique au Leti.

Bien plus qu'un réseau de communication, la 5G sera une véritable plateforme d'orchestration, indispensable aux CPS dont l'objectif est bien de « passer d'une collection d'objets intelligents et/ou connectés, à un système qui soit plus que la somme de ses parties », conclut Jean-Noël Patillon. ♦



Le dispositif G-Link du Leti permet des transferts sans fil à très haute vitesse de données.

# L'indispensable approche système



Système test intégrant un CPS piloté par la plateforme Papyrus 4 du List dédiée au *manufacturing* avancé.

Passerelles entre le monde physique et virtuel, capables de décisions, imaginés pour des activités critiques et donc ne tolérant aucune marge d'erreur : les systèmes cyberphysiques (CPS) sont l'incarnation de la complexité. À ce niveau, leur conception doit être pensée de manière globale, selon une approche dite « système » qui fait déjà ses preuves.

« Lorsqu'un industriel fait appel à nous, il vient avec une problématique "simple" comme vendre des pièces ou bien vendre de la maintenance. Mais, cela devient pour nous une question de capteurs, logiciels, consommation énergétique, fiabilité, coût... D'où une réponse forcément complexe ! » confie François Terrier, chef de département du List.

L'un des éléments clé de la conception d'un CPS réside alors dans la capacité à le modéliser et à simuler son comportement au plus près de la réalité ; non seulement pour s'assurer qu'il répond à toutes les spécifications, mais également que son

fonctionnement est sûr et sécurisé. « Une des problématiques essentielles est la définition du bon niveau d'abstraction pour un ensemble de sous-systèmes aussi différents qu'un circuit électronique, une intelligence artificielle ou le monde physique, explique le spécialiste. Il faut être assez précis pour un rendu le plus fidèle possible. En même temps, il ne faut pas mettre nos modèles hors de portée des calculateurs. » Ce à quoi s'ajoute la difficulté de faire interagir et synchroniser des éléments aux logiques parfois radicalement différentes : « le monde physique évolue en temps continu alors qu'un logiciel avance selon un pas de temps fini », illustre-t-il.

## Papyrus, notice clé en main de la conception d'un CPS

Pour rationaliser la chaîne de conception d'un CPS, le CEA développe des outils de pointe. Par exemple, la plateforme Papyrus, simple d'utilisation à la manière d'un tableur, permet de saisir l'ensemble des spécifications et des contraintes relatives à un système. Charge ensuite à la plateforme de les traduire dans un langage mathématique pour s'assurer que l'ensemble des exigences sont satisfaites. « En cas de modification d'une spécification, Papyrus permet d'en mesurer l'effet sur l'ensemble et, en plus, de partager l'information entre les différents composants qui, souvent, n'utilisent pas le même langage », explique François Terrier.

Récemment, Papyrus a été mis à profit, dans le cadre d'une collaboration avec l'équipementier Plastic Omnium, pour développer des réservoirs « intelligents » optimisant la gestion du carburant ou traitant de questions de dépollution. « Il s'agissait de concevoir un système avec de la physique, de l'électronique et du logiciel, précise l'ingénieur. L'ensemble n'était connecté qu'avec la voiture, non avec le monde extérieur, mais on se rapproche du CPS ». Plus proche encore, ce système réalisé par Pernoud, leader des moules d'injection plastique. L'enjeu pour cette entreprise ? Rien de moins que de passer à des moules intelligents connectés sur le cloud. La solution ? Équiper ses moules de capteurs pour contrôler et optimiser les processus et la maintenance. Comment ? Agir sur des actionneurs au niveau des moules ; informer l'opérateur de production, via la remontée de paramètres et d'alarme, sur le fonctionnement de la chaîne ; et transmettre des données jusqu'à la maison mère, via le cloud, pour un suivi en ligne de l'usure des équipements. « Nous avons ainsi créé une partie des logiciels embarqués, tout comme ceux permettant de connecter les machines à l'usine et la maison mère, à partir d'une modélisation du système électronique et logiciel et de ses interactions avec l'extérieur, détaille François Terrier, qui ajoute : là on est vraiment dans le cyberphysique ! » ♦

# Sûreté et sécurité en ligne de mire

Des systèmes connectés au monde réel, via une armada de capteurs reliés les uns aux autres grâce aux réseaux numériques, qui prennent des décisions dans des situations critiques et sans intervention humaine ?

À n'en pas douter, les systèmes cyberphysiques (CPS) posent de cruciales questions de sûreté et de sécurité.

**S'**assurer de la sûreté d'un système, c'est vérifier qu'il se comporte tel que l'ont prévu ses concepteurs. Ainsi, les spécialistes du List traquent les « bugs » à travers leur plateforme Frama-C. Initialement développée pour la vérification de codes critiques embarqués, notamment dans l'avionique et le nucléaire, Frama-C convertit les programmes en un ensemble de propositions mathématiques afin de garantir que ledit programme, dont elles constituent une image miroir, ne contient aucune incohérence.

**Nous commençons tout juste à savoir comment poser proprement la question de la sûreté des réseaux de neurones...**

François Terrier, chef de département au List

Comme l'indiquent les orientations de l'agence américaine DARPA<sup>1</sup> et du plan national sur l'intelligence artificielle, la **vérification formelle** (par exemple les techniques intégrées à Frama-C) est essentielle pour l'analyse et surtout la validation des nouveaux objets informatiques que sont les programmes d'apprentissage profond de type **réseaux de neurones**<sup>2</sup> ; programmes amenés à jouer un rôle important dans les systèmes cyberphysiques (CPS). « *Nous commençons tout juste à savoir comment poser proprement la question de la sûreté des réseaux de neurones, à savoir que la façon dont ces codes prennent des décisions est fonction de la manière dont ils ont "appris" à le faire...* », indique François Terrier, chef de département au List.

**De la sûreté à la sécurité, des logiciels et composants, en passant par la certification**

« *Multiconnectés, les CPS offrent une très grande surface d'attaque. Souvenez-vous, en 2015, de l'expérience de ces deux experts américains parvenant à stopper à distance une Jeep connectée...* » expose Laurent Olmedo, directeur du programme de recherche en sécurité globale du CEA. *La question de leur sécurité est donc au premier plan de nos préoccupations.* » C'est ainsi que Frama-C inclut également des modules s'assurant qu'un programme ne contient aucune faille

pouvant constituer une porte d'entrée pour une attaque. Tout comme une équipe du Leti s'est spécialisée dans la sécurité des composants : architectures de puces interdisant d'y lire des informations depuis l'extérieur ; capteurs insérés sur un composant lui permettant de repérer une attaque ; des circuits vierges de rayonnement électromagnétique ou présentant une consommation constante quel que soit son niveau d'activité ; logiciels embarqués résistants à l'injection de fautes... Comme le résume Bruno Charrat, chef de service au Leti : « *Nous sommes des fournisseurs de briques de base technologiques.* » Sans compter que le Leti est passé maître dans l'art de la certification de sécurité et héberge notamment l'un des trois Centres d'évaluation de la sécurité des technologies de l'information (Cesti). Fort de cette expertise, il a présenté en mars dernier un protocole d'accord avec Bureau Veritas pour la fourniture d'un banc d'essai d'homologation de la sécurité des systèmes électroniques industriels.

**Innovation de rupture pour cybersécurité intrinsèque**

À moins que, dans le futur, les CPS soient intrinsèquement sûrs... Grâce aux travaux du List, il apparaît possible de manipuler des données sans avoir à les déchiffrer au préalable, ce qui leur permettrait de circuler ou d'être utilisées sans risque d'être interceptées par un tiers malveillant. Il s'agit là de cryptocalcul homomorphe dont une innovation de rupture a été testée dans le cadre du projet européen HC@Works coordonné par le List. « *Nous avons franchi le seuil au-delà duquel l'implémentation de ce formalisme, lourd en calculs, devient possible dans des cas concrets* » explique Renaud Sirdey, directeur de recherche au List. De quoi assurer le déploiement sans faille des CPS ! ♦

## Vérification formelle

Mise en œuvre des techniques mathématiques pour démontrer qu'un système se conforme aux propriétés qui en sont attendues.

## Réseaux de neurones

Ensemble virtuel de milliers d'unités (neurones) effectuant de petits calculs simples, le tout organisé en couches successives pour que le résultat de la première couche nourrisse la deuxième et ainsi de suite...

## Notes :

1. *Defense Advanced Research Projects Agency*, agence du département de la Défense des États-Unis.

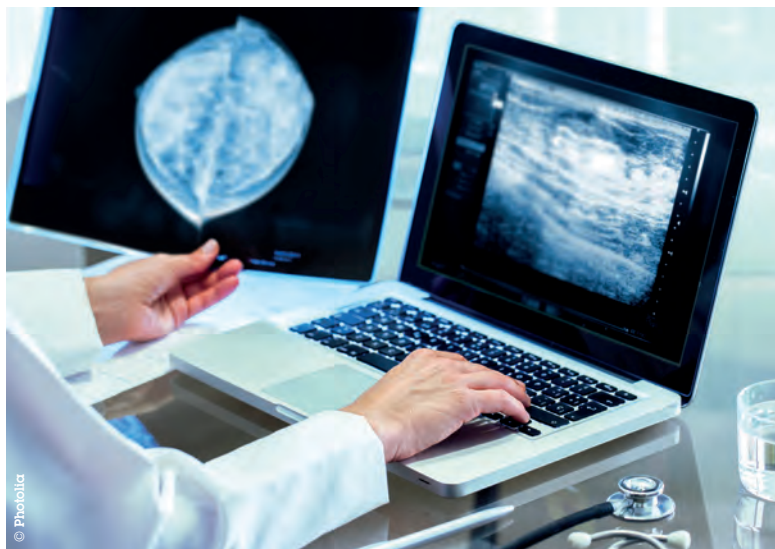
2. Voir pp 9 à 11 *Les défis du CEA* n° 210.

**Leti/CEA Tech**

Laboratoire des micro & nanotechnologies  
et leur intégration dans les systèmes

**Liten/CEA Tech**

Laboratoire des nouvelles technologies  
de l'énergie et des nanomatériaux



**Imagerie médicale**

## Tumeurs démasquées au premier coup d'œil

Grâce aux nouveaux détecteurs spectrométriques non refroidis du **Leti**, les tissus sains de glandes mammaires de souris se distinguent nettement des tissus tumoraux. De quoi envisager des dispositifs encore plus discriminants. Car, si la radiographie X fournit une image de qualité, elle ne renseigne que sur la densité et non sur la nature des tissus. De fait, cette technique d'imagerie qui mesure l'atténuation des rayons transmis ne tient pas compte des rayons diffusés qui apportent pourtant des informations spécifiques sur la structure des tissus.

Pour tirer parti de ces rayons diffusés, les chercheurs du **Leti** avaient besoin d'outils décelant la signature spectrale de diffusion des tissus malades en conditions cliniques. C'est chose faite grâce à leurs détecteurs à base de CdZnTe<sup>1</sup>, capables de mesurer l'énergie des photons reçus, et fonctionnant sans avoir besoin d'être refroidis. Après de premiers essais précliniques concluants, les chercheurs expérimentent à présent des échantillons plus complexes (autres tumeurs et niveaux de maturité), avant de passer aux tissus humains. *CW*

**Note :**

1. Tellure de cadmium et zinc, matériau utilisé dans la fabrication de détecteurs de radiations.

**Optique & photonique**

## Un micro-écran d'une résolution exceptionnelle

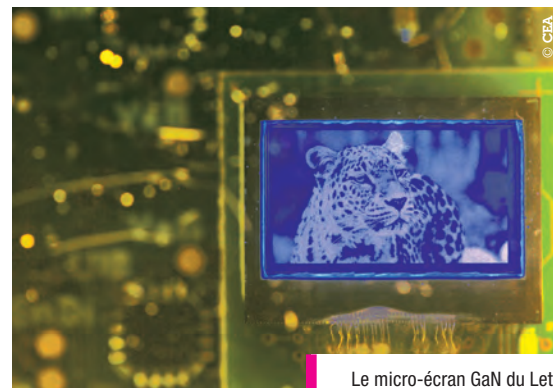
Le micro-écran GaN<sup>1</sup> du **Leti** est doté de la plus haute résolution jamais atteinte pour un pas de pixel de 10 microns. Réalisé en collaboration avec le **III-V Lab**<sup>2</sup>, il repose sur plusieurs avancées technologiques dont la mise au point de la matrice de micro-LED et son assemblage, via une technique d'hybridation spécifique, à une matrice active CMOS pilotant individuellement chaque micro-LED pour écrire l'image. Prochaine étape : passer du monochrome à la couleur, et poursuivre le développement d'une approche de fabrication innovante pour réduire le pas de pixel jusqu'à trois microns. *AG*

**III-V**

Matériau semi-conducteur composé d'éléments des colonnes III et V du tableau de Mendeleïev ; le plus utilisé dans l'industrie, après le silicium, notamment pour des applications optoelectroniques.

**Notes :**

1. Nitrure de gallium.
2. Laboratoire commun CEA/Thalès/Nokia.



Le micro-écran GaN du **Leti**.

**Matériaux**

## Le 316LN résiste à l'épreuve de la fabrication additive

Une première pour la fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre : les chercheurs du **Liten** parviennent à produire des pièces en 316LN, acier inoxydable utilisé pour certaines applications nécessitant des propriétés mécaniques au-delà des capacités des nuances classiques (304L, 316L). Les pièces obtenues présentent de meilleures caractéristiques que celles réalisées en conditions identiques avec du 304L ou du 316L, tels que l'attestent les tests de traction et de résistance aux chocs. De plus, la quantité d'énergie nécessaire est inférieure de 39 % au minimum publié dans la littérature. Une avancée obtenue dans le cadre d'un partenariat avec Naval Group. *CW*



Matériaux à la plateforme métallurgie des poudres du **Liten**.

Physiologie végétale

## Les super-antioxydants du romarin

Incontournable plante aromatique, le romarin est aussi recommandé pour ses vertus antioxydantes, reposant sur deux principaux composés : l'acide carnosique et le carnosol. Ces deux molécules protègent la plante des radicaux libres, connus pour altérer les lipides des membranes des cellules. Bien que l'acide carnosique soit largement utilisé sous forme d'extraits naturels de romarin (agroalimentaire, médecine, santé et cosmétique), son mécanisme d'action restait mal connu. Des scientifiques du **Biam**, en collaboration avec la société Naturex<sup>1</sup> et l'**Institut Frédéric-Joliot**, viennent de l'élucider !

Leurs travaux montrent les effets protecteurs de l'acide carnosique et du carnosol sur les lipides, selon un mode opératoire en cascade. L'acide carnosique agit comme piègeur chimique des espèces toxiques de l'oxygène, processus au cours duquel il est converti en divers dérivés oxydés dont le carnosol. Ce dernier agit en revanche directement au niveau des lipides en bloquant les réactions en chaîne d'oxydation. SR



Note :  
1. Leader mondial des extraits de romarin.

Solaire photovoltaïque

## Dans une norme internationale

Elle vient d'être intégrée à la toute nouvelle norme internationale des modules photovoltaïques IEC 62788-1-6 :2017. La technique développée par le **Liten**, en collaboration avec Arkema, permet de vérifier la qualité de l'assemblage des cellules dans un module photovoltaïque. Plus précisément, il s'agit de mesurer le taux de **réticulation** des deux couches de polymère transparent qui encapsulent les cellules, en vue de protéger le module contre les agressions extérieures. La méthode développée est basée sur l'observation du pic de cristallisation des polymères par *Differential scanning calorimetry* (DSC). Très rapide (quelques minutes), cette technique ne fait pas intervenir de produits toxiques comme la méthode classique par extraction de solvants. AG

Réticulation

Processus formant des réseaux tridimensionnels de liaisons chimiques par lesquels, par exemple, un polymère mou au départ devient dur.



Inspection visuelle de modules photovoltaïques après leur encapsulation.

**Biam/CEA**  
Institut de biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille

**Institut des sciences du vivant**

**Frédéric Joliot/CEA**

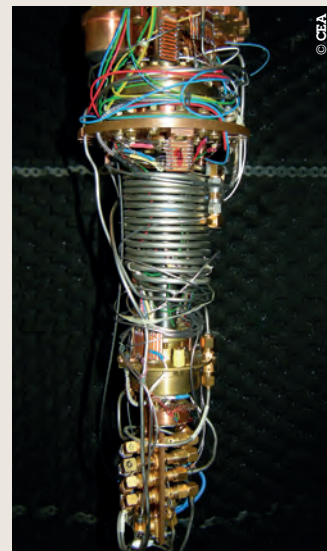
Recherche fondamentale, technologique, méthodologique et appliquée en biologie, santé et bioénergie

**Inac/CEA**

Institut nanosciences et cryogénie

Information quantique

## Course au Qubit



Réfrigérateur à dilution hélium3/hélium4 dans lequel les QuBits sont mesurés à une température inférieure à 100mK.

Les chercheurs de l'**Inac** et du **Leti** avaient développé, en 2016<sup>1</sup>, le premier **bit quantique (QuBit)** de spin avec des transistors nanofils CMOS. Si ce Qubit est intrinsèquement rapide en manipulation, il reste à mettre au point une lecture rapide de son état. La technique privilégiée est la réflectométrie radio-fréquence, qui consiste à envoyer un signal micro-ondes sur une grille du transistor et mesurer le signal réfléchi. L'équipe de l'**Inac** a implémenté cette technique sur des échantillons du **Leti** avec deux grilles en série, identiques au QuBit<sup>2</sup>. Très récemment, ils ont démontré le couplage entre canaux en parallèle, ce qui ouvre la voie à l'intégration de plusieurs QuBits couplés. Même si l'ordinateur quantique n'est pas encore pour demain ! AG

Bit quantique (QuBit)

Unité élémentaire d'un système d'information dont la particularité, quantique, est de se présenter, en général, dans une superposition de ses deux états, état «0» et état «1».

Notes :

1. Maurand et al., Nature Comm. 2016.
2. Crippa et al., 2017.

## Génomique

## Décryptage d'un légionnaire qui envahit l'Afrique

Le papillon de nuit *Spodoptera frugiperda* est pris très au sérieux par la communauté scientifique dont des chercheurs de l'Inra, du CEA et de l'Inria<sup>1</sup> qui viennent de séquencer son génome. Surnommé le Légionnaire d'automne, il s'attaque à plus d'une centaine de plantes, notamment maïs, riz, sorgho, coton, soja, à tel point que ses dégâts, au Brésil, sont estimés par la FAO<sup>2</sup> à 600 millions de dollars par an. Depuis janvier 2016, il envahit l'Afrique et menace aujourd'hui le continent européen.

L'étude de son génome a d'abord porté sur les gènes impliqués dans la reconnaissance des plantes hôtes, permettant au *Spodoptera frugiperda* de se nourrir ou d'y déposer ses œufs. Elle révèle ainsi un nombre étonnamment important de gènes correspondants à la détection de toxines ou de composés amers produits par les plantes. Les chercheurs se sont ensuite intéressés à d'autres familles de gènes nécessaires pour contrer les défenses chimiques que les plantes surproduisent lorsqu'elles sont attaquées. Là aussi, une expansion des gènes, comparée à leurs congénères, a été découverte : et ce sont les mêmes gènes qui peuvent être impliqués dans les résistances aux pesticides.

Mises à la disposition de la communauté scientifique internationale, toutes ces données vont permettre d'envisager de nouveaux moyens de lutte biologique et de mieux comprendre les mécanismes d'apparition de résistance aux pesticides. SD



## Notes :

1. Dans le cadre du consortium international *Fall Armyworm*.
2. *Food and Agriculture Organization of the united nations*.



## AMINOCRAFT, APPLICATION LUDIQUE POUR APPRENDRE LES ACIDES AMINÉS

Parce que les acides aminés constituent les éléments de base de la fabrication des protéines, les étudiants des filières de biologie et de santé doivent apprendre par cœur leur structure chimique : un exercice rébarbatif voire désagréable. C'est la raison pour laquelle deux chercheuses de l'Institut de biologie structurale de Grenoble (CEA/CNRS/UGA) ont conçu une application pour *smartphone* pour mémoriser les acides aminés tout en s'amusant.

Disponible gratuitement en français et en anglais, sous Android ou iOS, AminoCraft propose deux niveaux : l'un « débutants » avec des quiz pour se familiariser ; l'autre « expérimentés » permettant de fabriquer des acides aminés à partir d'une trame et de groupements chimiques.

**Aminocraft**  
Eve de Rosny  
et Véronique  
Rossi  
Sous Android  
ou iOS



### 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.**

## QUOI DE NEUF DANS LA CONNAISSANCE ?



Trente ans après leur *Conversations sur l'invisible*, les deux astrophysiciens du CNRS et du CEA et le scénariste-dramaturge-écrivain font le point sur la connaissance du monde. L'occasion de s'immiscer dans leur discussion, parfois très informelle, sur plus d'une cinquantaine de thématiques qui convoquent autant le visible que l'invisible : 0,2 seconde d'observation ; *do-it-yourself* ; un cerveau dans le ventre ; l'énigme de la lumière ; l'invention du désordre ; ils ont trouvé le boson de Higgs ; l'école quantique de Michel Cassé...

*Du nouveau dans l'invisible / Jean Audouze, Michel Cassé, Jean-Claude Carrière - Éditions Odile Jacob. 22 €*

## HOMO ANIMALUS ?



« Par notre origine, nous sommes à la fois animaux et humains. Ce qui fait de nous des êtres humains, ce n'est pas uniquement ce que nous sommes, mais ce que nous choisissons d'être ». En convoquant la biologie, l'anthropologie et la philosophie, les auteurs s'interrogent sur les origines de l'humanité. Une enquête, restituée dans des textes courts et didactiques, qui donne à réfléchir sur le racisme, le créationnisme, le rapport homme-animal, ou encore la façon dont les humains évoluent

dans un milieu qu'ils sont en train de détruire.

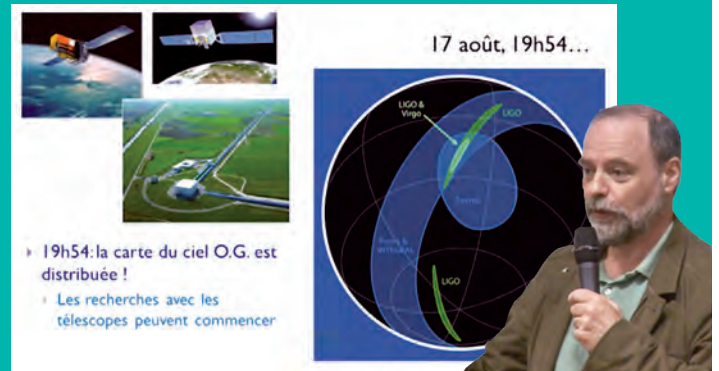
*L'homme est-il un animal comme les autres ? / Jean-Baptiste de Panafieu, Étienne Lécroart - Éditions La ville brûle. 8,50 €*

## EXERCICES CRITIQUES



Destiné aux professeurs des cycles 2 et 3, cet ouvrage concerne tout le monde tant il propose de mieux appréhender le monde en évitant les conclusions hâtives ou les préjugés. Ce guide pédagogique, pensé par la fondation La main à la pâte, se déroule sur cinq étapes structurant tout raisonnement scientifique : observer, expliquer, évaluer, argumenter, inventer. Les enseignants y trouveront des modules d'activités de classe clés-en-main, des éclairages pédagogiques et scientifiques ainsi qu'une riche bibliographie.

*Esprit scientifique, esprit critique / Gabrielle Zimmermann, Elena Pasquinelli, Mathieu Farina - Éditions Le Pommier. 29 €*



19h54: la carte du ciel O.G. est distribuée !  
Les recherches avec les télescopes peuvent commencer

### Conséquence - 3



### Astrophysique

## Ondes gravitationnelles et contreparties lumineuses

Revivez la découverte, le 17 août 2017, de la première onde gravitationnelle résultant de la fusion de deux étoiles à neutrons avec les astrophysiciens du CEA, Roland Lehoucq, Philippe Laurent, Diego Götz, Fabian Schussler et Stéphane Schanne. L'occasion privilégiée de bien comprendre la nature de ce phénomène et de revivre la course haletante à la quête des contreparties lumineuses de cet événement. Certains de ces astrophysiciens ont en effet reçu une alerte depuis leur lieu de villégiature, l'été dernier, pour pointer leurs instruments d'observation à la recherche de l'émission lumineuse produite par le jet de matières issu de la fusion de ces étoiles à neutrons.

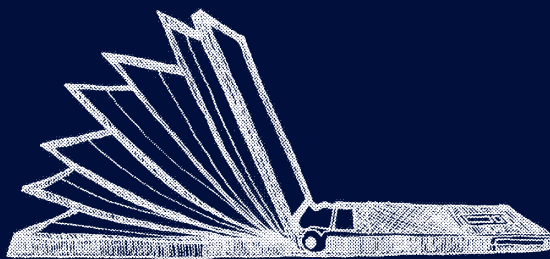
<https://www.youtube.com/user/CEASciences>



cité de la réussite

le forum des débats culturels, économiques, scientifiques et politiques

« *Comprendre le monde par le dialogue et le débat pour mieux s'y insérer, s'y mouvoir et pour le transformer.* » Tous les deux ans, la Cité de la Réussite convie les citoyens à plus de quarante débats, auxquels participent des personnalités du CEA, le temps d'un week-end à la Sorbonne.



LA CITÉ DE LA RÉUSSITE FAIT

# L'ÉLOGE DE LA TRANSMISSION

Venez échanger et dialoguer  
autour du thème de **la Transmission.**

**18 & 19 NOV. 2017 À LA SORBONNE - 20ÈME ÉDITION**

**45 DÉBATS – 150 PERSONNALITÉS**

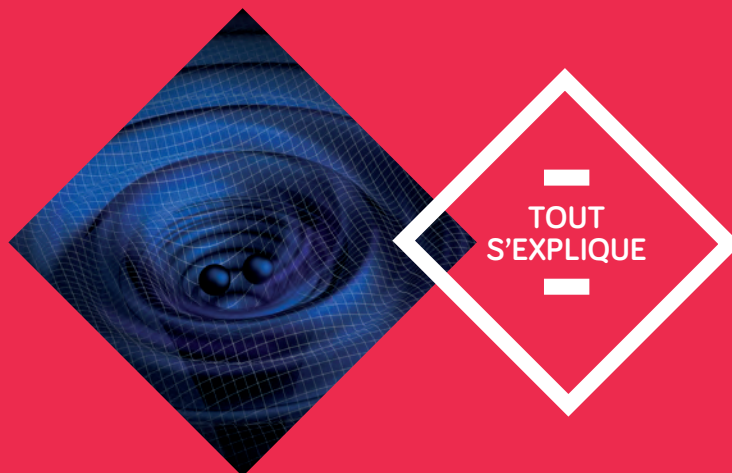
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



PARTENAIRE DE LA CITÉ DE LA RÉUSSITE

[citedelareussite.com](http://citedelareussite.com)





# Les ondes gravitationnelles

Ondulations de l'espace-temps dues à l'accélération ponctuelle de la matière dans l'Univers, les ondes gravitationnelles ont été prédites par Albert Einstein en 1915. La première a été découverte expérimentalement le 14 septembre 2015, par la collaboration Ligo-Virgo, mettant en scène la fusion de deux trous noirs.

Deux ans après, le 17 août 2017, cette collaboration internationale en est à sa cinquième détection, avec, nouvelle première, une onde gravitationnelle résultant de la fusion de deux étoiles à neutrons.

## ENJEU



Si le Prix Nobel de physique 2017 a été attribué aux chercheurs de l'expérience Ligo-Virgo, Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne, c'est bien que leur découverte de la première onde gravitationnelle fût révolutionnaire, à plus d'un titre. Elle confirma leur prédiction par Einstein, tout comme elle officialisa l'existence de trous noirs (également théorisée dans la Relativité Générale) et en révéla une nouvelle classe, de taille intermédiaire (en l'état, 39 et 26 masses solaires) jamais observée avant 2015. La récente observation d'une onde gravitationnelle résultant de la fusion de

deux étoiles à neutrons est également un événement important. D'autant que cet événement cosmique s'est accompagné d'une contrepartie lumineuse que les astrophysiciens du monde entier, y compris au CEA, se sont empressés de traquer depuis le sol et l'espace. La communauté scientifique va dès lors pouvoir étudier ce phénomène, jamais observé auparavant, pour mieux comprendre l'origine des éléments très lourds de l'Univers (qui se forment notamment à l'occasion de ce type d'événements cataclysmiques) et même de mesurer le taux d'expansion de l'Univers.

# Les ondes gravitationnelles

## PRINCIPE



Issues d'événements cosmiques spectaculaires, elles parcourent l'Univers en déformant l'espace-temps. Pour découvrir ces ondes gravitationnelles, Einstein a imaginé une histoire d'équivalence, masse, gravitation, accélération ; et les collaborations internationales Ligo-Virgo ont bâti des instruments géants...

### La théorie de la relativité générale

#### PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

→ La trajectoire de la lumière est courbée par la gravitation

En chute libre, nous ne sentons pas notre poids et nos objets proches (lunettes, clés...) tombent de la même manière que nous (vitesse, trajectoire...), comme si l'accélération de la chute effaçait le champ de gravitation local... Si cette accélération peut effacer localement la gravitation, elle pourrait aussi en créer l'apparence alors qu'il n'y en a pas ? C'est le principe d'équivalence d'Einstein.

Or, ce principe implique que la lumière, bien que de masse nulle, ne se propage pas de façon rectiligne : un faisceau de lumière traversant un ascenseur en élévation, parallèlement à son plancher, atteindra la paroi opposée de la cabine sur un point plus proche du plancher que l'orifice de départ.

#### GRAVITATION

→ La gravitation n'est pas une force mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps

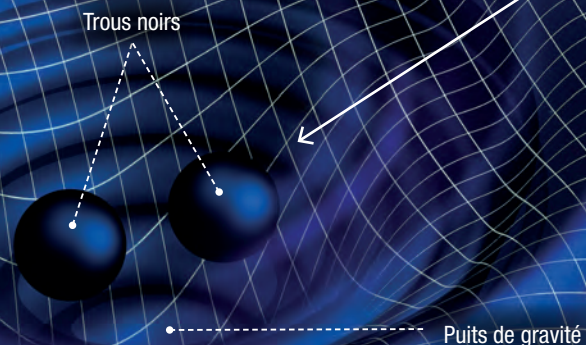
Mais qu'est-ce que la gravitation ? Selon Newton, c'est une force qui attire des corps entre eux, sous l'effet de leur masse : la Terre tourne ainsi autour du Soleil qui exerce sur elle une force gravitationnelle.

Pour Einstein, et son principe d'équivalence : la Terre tourne autour du Soleil parce qu'elle se soumet à la configuration de l'espace-temps, lequel est localement courbé par la masse du Soleil.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

→ La forme de l'espace-temps dépend de la matière qui s'y loge

Cette courbure de l'espace-temps peut être calculée, en fonction de la distribution des masses, dans une équation à double-sens : la courbure (G) de l'espace-temps ( $G_{\mu\nu}$ ) dicte le mouvement de la matière (T) qui le compose ; et la matière dicte la déformation de l'espace-temps.

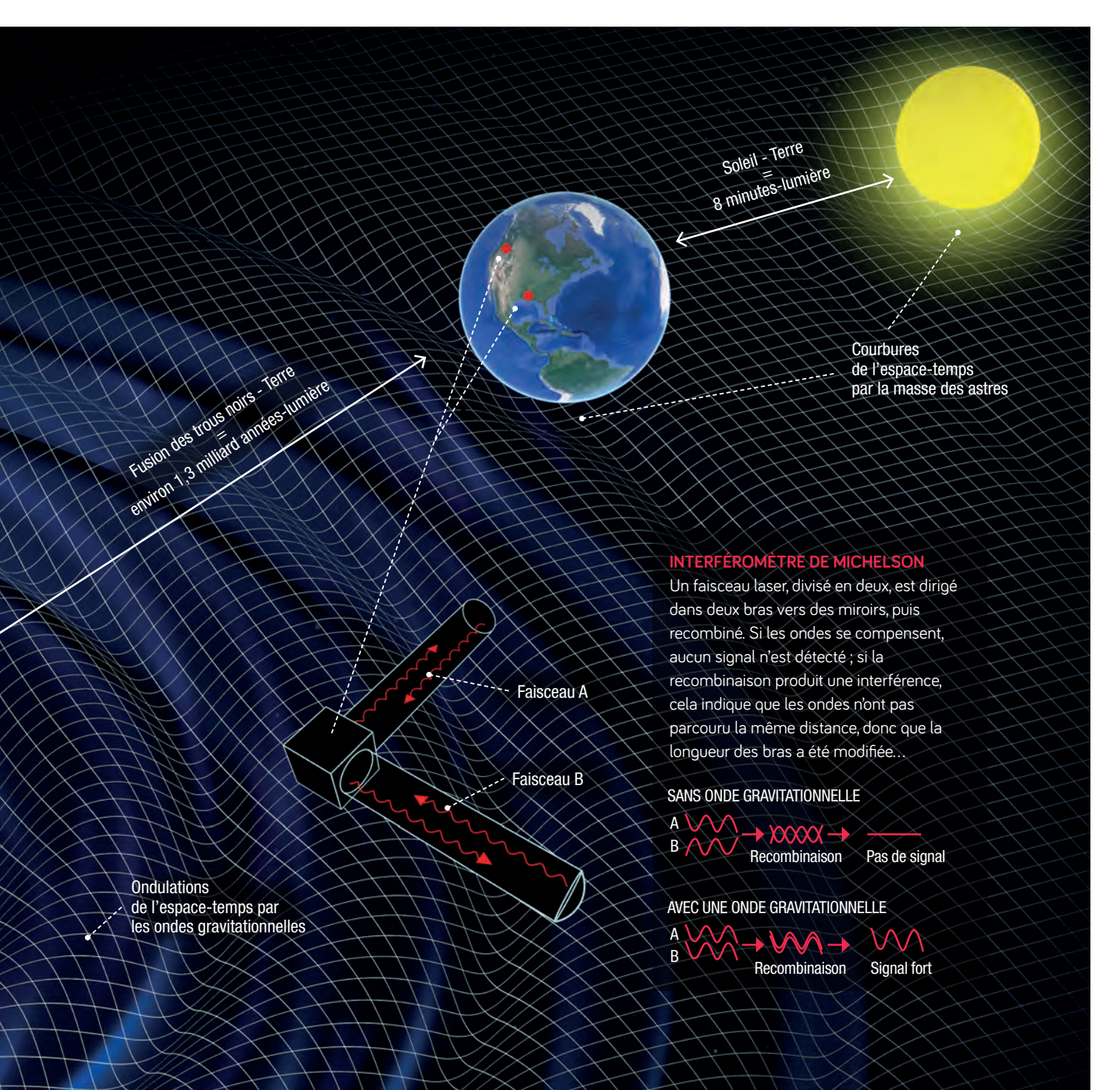


#### LES ONDES GRAVITATIONNELLES

→ L'accélération de la matière ondule l'espace-temps

Et si la masse de la matière était accélérée, pourrait-elle rayonner des ondes comme une charge électrique accélérée émet des ondes électromagnétiques ?

Voici le principe des ondes gravitationnelles (OG) qu'Einstein identifie à des ondulations de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière : au passage d'une OG, l'espace se dilate puis se contracte.



**INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON**

Un faisceau laser, divisé en deux, est dirigé dans deux bras vers des miroirs, puis recombéné. Si les ondes se compensent, aucun signal n'est détecté ; si la recombinaison produit une interférence, cela indique que les ondes n'ont pas parcouru la même distance, donc que la longueur des bras a été modifiée...

**SANS ONDE GRAVITATIONNELLE**



**AVEC UNE ONDE GRAVITATIONNELLE**



**L'observation des ondes gravitationnelles**

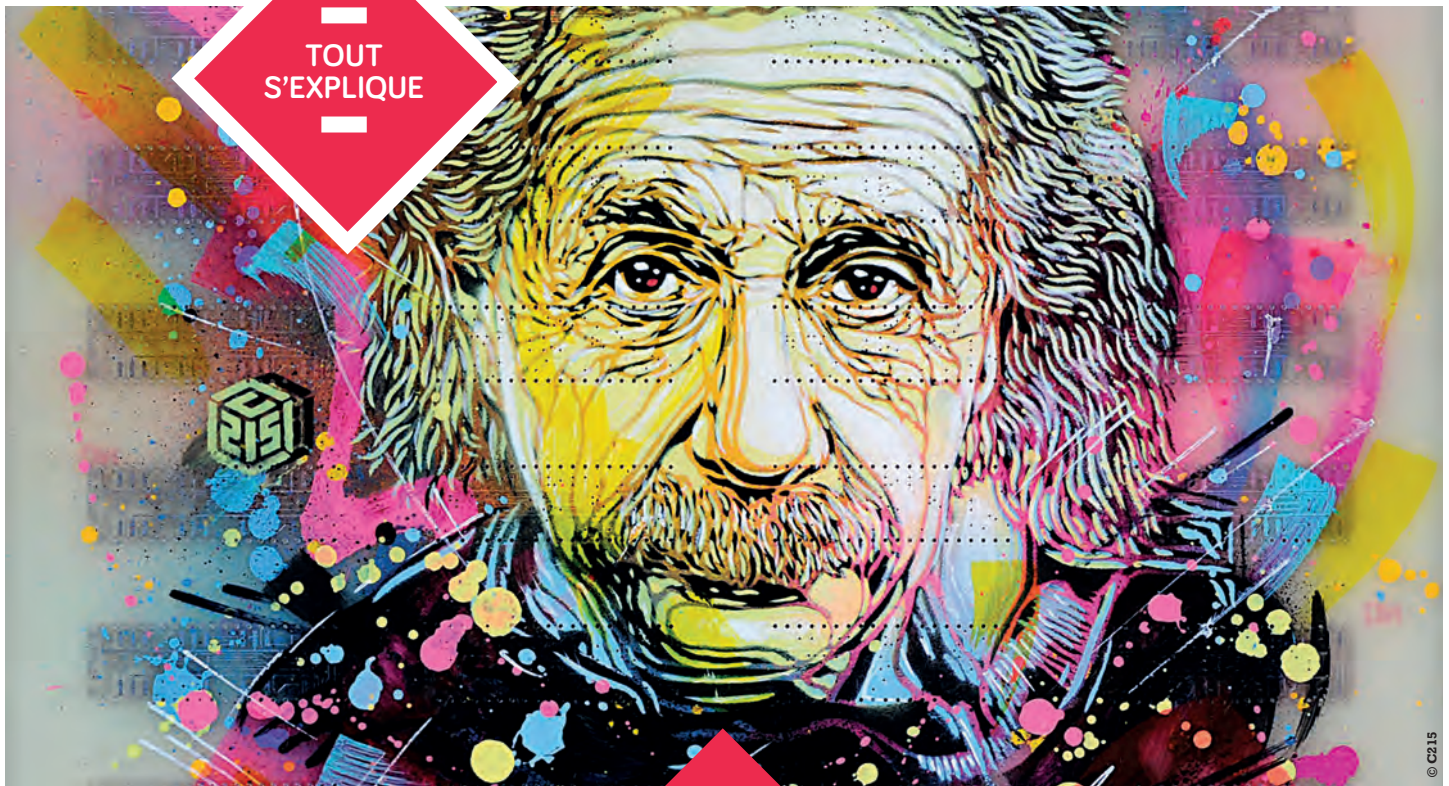
**DÉTECTION**

→ Voir une déformation locale de notre espace-temps sur Terre : mesurer la distance entre deux points de référence et répéter la mesure pour « voir » si cette distance s'est soudainement allongée et/ou rétrécie. Cela, par la lumière et avec un interféromètre de Michelson.

→ Déduire le passage d'une onde gravitationnelle sur Terre : faire ces mesures en deux lieux distincts pour détecter les déformations en prenant en compte l'intervalle de temps nécessaire à la lumière pour parcourir le trajet entre ces deux endroits (l'onde se propageant à la vitesse de la lumière).

**IDENTIFICATION**

En menant ces expériences avec deux interféromètres géants installés à 3 000 km de distance (Hanford/Washington et Livingston/Louisiane), les équipes de la collaboration Ligo-Virgo ont détecté les premières ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015. Selon leurs analyse, elles résultent de la fusion, il y a 1,3 milliard d'années, de deux trous noirs d'environ 36 et 29 masses solaires ; et elles ont engendré une déformation de l'espace-temps de  $10^{-19}$  m.



## Une prouesse qui aurait sidéré Einstein...

par Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences, directeur du Larsim / CEA

En 1916, Einstein était à Berlin, malade et épuisé ; mais toujours alerte pour se demander si une masse en mouvement accéléré pouvait rayonner des « ondes gravitationnelles », comme une charge électrique qu'on accélère rayonne des ondes électromagnétiques. Il découvrit rapidement des solutions de ses équations correspondant à des ondulations de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. Au cours de leur voyage, elles secouaient l'espace-temps, modifiant brièvement la distance séparant deux points dans l'espace.

La gravitation étant très faible en intensité, de telles ondes sont très difficiles à détecter : même des phénomènes extrêmement puissants n'engendrent que des amplitudes ridiculement petites. De fait, les premières ondes gravitationnelles détectées le 14 septembre 2015, n'ont pu être mesurées de façon directe qu'avec la complicité d'un événement monstrueux et sans doute très rare qui s'est produit il y a plus d'un milliard d'années : deux trous noirs voisins ont fusionné à une vitesse égale aux deux tiers de la vitesse de la lumière. Ce phénomène hyper-violent a libéré une énergie inimaginable en seulement 20 millisecondes, et engendré un train d'ondes gravitationnelles qui ont progressivement perdu de la puissance au cours de leur long voyage. Leur passage au travers de la Terre a pu être détecté grâce aux instruments extrêmement sensibles de l'expérience Ligo-Virgo. Une prouesse qui aurait sidéré Einstein, lui qui ne croyait pas que de telles ondes puissent un jour être détectées : pour cause, les variations de longueur sont de l'ordre de  $10^{-19}$  mètre,

c'est-à-dire largement inférieures à la taille d'un proton ! Pour effectuer une telle mesure, il est vain d'utiliser une règle matérielle qui serait elle-même déformée au passage de l'onde gravitationnelle. Il faut donc utiliser une règle qui ne s'étire ni ne se contracte : la lumière. Sa vitesse étant invariante, si l'espace entre deux points se dilate, elle mettra plus de temps à parcourir la distance qui les sépare ; si, au contraire, l'espace se contracte, il lui faudra moins de temps. C'est donc grâce à un faisceau de lumière laser séparé en deux faisceaux envoyés dans deux directions perpendiculaires puis recombinaison l'un à l'autre, que les physiciens ont pu mesurer l'effet du passage de l'onde gravitationnelle : les interférences des deux faisceaux se trouvent modifiées dès qu'une onde gravitationnelle vient allonger ou raccourcir la distance parcourue par chacun d'eux.

L'histoire ne manque pas d'ironie, car Einstein n'a jamais cru en l'existence des trous noirs. Or, ce sont bien de tels objets qui, en fusionnant, ont permis que soient enfin détectées les premières ondes gravitationnelles qu'il avait prédites. Une nouvelle fenêtre s'ouvre ainsi sur l'univers, car les ondes gravitationnelles se propagent sans être absorbées par la matière, contrairement aux ondes électromagnétiques qui constituent la lumière. Cette propriété leur permet de parvenir jusqu'à la Terre en conservant la trace des caractéristiques des sources qui les ont engendrées, telles des explosions d'étoiles, des trous noirs en formation, ou encore des collisions d'étoiles denses.

Reprise de la version publiée dans les Défis du CEA de février 2016