

# les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

205

Mars 2016

TOUT  
S'EXPLIQUE

Supplément détachable  
sur la salle  
immersive

02

## L'INTERVIEW

◆ Sylvain Lemelletier, de GRT Gaz et Laurent Bedel, du Liten / CEA Tech présentent le *power to gas* de Jupiter 1000 ◆

04

## ACTUALITÉ

◆ En 2016, offrez un robot à votre entreprise! ◆ Entreprendre au CEA? C'est possible! ◆ Partenariat du CEA et de l'École des Mines autour du démantèlement ◆ Bureau Veritas et le CEA renforcent la fiabilité et la performance des logiciels embarqués ◆

07

## SUR LE VIF

◆ Assembler deux matériaux impossible... à assembler ◆ Un processeur au Q.I supérieur à la normale ◆ Attention, ça va « moins » chauffer ◆

09

## LE POINT SUR

◆ La fabrication additive ◆

20

## SCIENCES EN BREF

◆ Test de crise pour le combustible coréen ◆ 19,1 mW pour encoder une vidéo ◆ 85 % de collecte des photons uniques ◆ 27,12 Mb/s de débit pour le passeport électronique ◆ Paludisme : les faux semblants de l'artémisinine ◆ Longue vie aux batteries ◆ Autodiagnostic des modules photovoltaïques ! ◆ Un mime pour les stades précoces d'Alzheimer ◆ Les lasers à fibre de puissance gagnent du terrain ◆

23

## KIOSQUE



12

DOSSIER

Fusion nucléaire

# Pièces uniques pour tokamak nippon



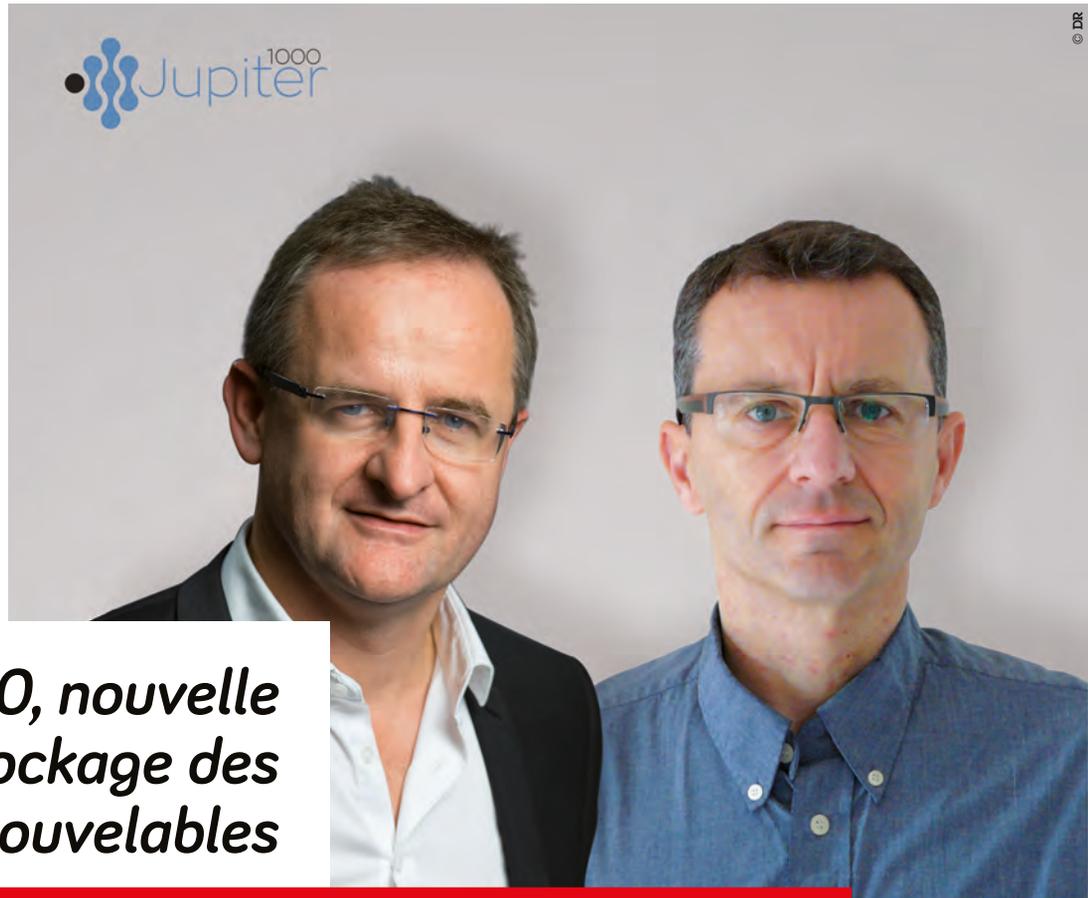
**SYLVAIN LEMELLETTIER**

directeur de projet chez GRT Gaz

&

**LAURENT BEDEL,**

expert-senior de l'institut Liten  
de CEA Tech



## Jupiter 1000, nouvelle recrue dans le stockage des énergies renouvelables

L'événement a été annoncé lors de la COP 21, en décembre dernier : le lancement du premier démonstrateur en France de *power to gas*, Jupiter 1000. Très innovant, il est piloté par GRT Gaz et bénéficie de l'expertise et des technologies de CEA Tech, pour valoriser les surplus d'électricité renouvelable... et recycler le CO<sub>2</sub>.

Propos recueillis par Aude Ganier

### En premier lieu, qu'est-ce que le *power to gas* ?

**Laurent Bedel :** Comme son nom l'indique, le *power to gas* (P2G) permet de convertir de l'électricité en un vecteur gazeux pour l'injecter dans le réseau de gaz naturel en vue de différents usages : production électrique<sup>1</sup>, transport GNV (véhicules légers, bus, poids lourds), chauffage des bâtiments, fours industriels et industrie chimique. Ce procédé, étudié initialement au Japon dans les années 1990, repose sur l'électrolyse de l'eau qui transforme le courant électrique en hydrogène et, moyennant une source de CO<sub>2</sub>, le convertit en méthane de synthèse par hydrogénation du CO<sub>2</sub>. Le P2G apporte ainsi une réponse à l'intermittence des énergies renouvelables en permettant de

stocker de forts surplus d'électricité dans le réseau de gaz. Et ce, en complémentarité avec d'autres solutions (batteries, barrages hydrauliques, volants d'inertie, supercapacités).

**Sylvain Lemelletier :** Dans cette perspective de valorisation des surplus d'électricité « renouvelable », le réseau gazier est un pilier important de la transition énergétique. Même si le gaz de synthèse reste plus cher que le gaz naturel, le P2G présente de nombreux avantages. Il peut gérer une grande quantité d'énergie, une conduite de gaz haute pression en transportant beaucoup plus qu'une ligne haute tension. De même, grâce au réseau de gaz existant, il offre un stockage flexible dans le temps et l'espace. On peut restituer l'énergie plusieurs mois après sa production et l'injecter à Marseille tandis qu'on l'utilise à la saison suivante à Lille, voire à l'autre bout de l'Europe. Ainsi, si je prends l'exemple de l'Allemagne qui a compris l'intérêt du P2G et expérimente plusieurs démonstrateurs depuis les années

Note :

1. Le gaz naturel produit 25 % de l'électricité mondiale.

« CEA Tech pouvait nous mettre en relation avec des industriels, fort de ses nombreux et fructueux partenariats. »

Sylvain Lemelletier de GRT Gaz.

2000 : la région qui produit beaucoup d'électricité (le nord-est du pays et ses parcs éoliens) n'est pas celle où il y a le plus besoin de la restituer (sud énergivore).

### Quelle est la genèse de Jupiter 1000, premier démonstrateur en France d'un réseau power to gas ?

**S.L.** : En tant qu'exploitant du plus long réseau de transport de gaz naturel à haute pression d'Europe (32 000 km), GRT gaz analyse depuis les années 2010 le potentiel du *power to gas* (P2G). Une étude, qu'il a co-financé en 2014 avec GrDF et l'ADEME, évalue en effet à 15 TWh/an le surplus d'énergies renouvelables à l'horizon 2030 (dont un marché de 3 TWh/an pour le P2G), et à 40 à 90 TWh/an en 2050 (de 20 à 50 TWh/an pour le P2G). En 2013, nous souhaitions construire un projet de réseau P2G basé sur l'injection de l'hydrogène. Nous avons été informés que CEA Tech développait l'idée d'un démonstrateur de P2G avec injection de méthane. Nous avons voulu combiner nos deux approches et nous sommes rapprochés des chercheurs de l'institut Liten pour bénéficier de leur expertise et savoir-faire sur la méthanation. Je savais également que CEA Tech pourrait nous mettre en relation avec des industriels, fort de ses nombreux et fructueux partenariats. C'est ainsi que, de fil en aiguille, est né Jupiter 1000.

**L.B.** : Lorsque GRT Gaz nous a contactés, nous travaillions en effet depuis 2011 sur le P2G, avec notamment le développement de réacteurs échangeurs compacts de méthanation du CO<sub>2</sub> dans le cadre du projet Carnot Sydgarh. Notre technologie validée, nous étions prêts à contribuer au premier démonstrateur français, Jupiter 1000. C'était également une opportunité de promouvoir nos recherches : dans ce cadre, nous avons créé un laboratoire commun avec la société Atmosat, aussi partenaire du projet, pour aller vers l'industrialisation de cette technologie de méthaneur, inédite à cette échelle.

## « Notre unité de méthanation très innovante repose sur un concept modulaire, à la manière d'un Lego. »

Laurent Bedel de CEA Tech.

### À ce sujet, quelles sont les innovations de Jupiter 1000 ?

**S.L.** : Jupiter 1000 est un pilote P2G très innovant à plusieurs titres. Il sera le premier à tester l'injection d'hydrogène et de méthane de synthèse dans le réseau transport de gaz. Tout comme il permettra d'expérimenter deux technologies d'électrolyseurs basse température en pression (alcalin et PEM) en vue d'acquies un solide retour d'expériences. Autre innovation, et non des moindres, nous allons valoriser le CO<sub>2</sub> des fumées industrielles pour la conversion de l'hydrogène en méthane.

**L.B.** : Quant à notre unité de méthanation très innovante, elle repose sur un concept modulaire à la manière d'un Lego. Il s'agit de la mise en parallèle de modules identiques, de taille standard et fabriqués en série. Cela permet de proposer des unités de puissance différentes avec des conversions en méthane supérieures à 90 %. La maintenance se fait par le remplacement ou la déconnexion de modules sans arrêter l'ensemble de l'unité. De plus, le refroidissement des modules est assuré avec une simple huile organique (et non des sels fondus, comme pour l'un de nos concurrents allemands), pour une meilleure durée de vie du catalyseur.

### Quelles sont les prochaines étapes ?

**S.L.** : Jupiter 1000 a été officiellement présenté lors de la COP 21 par l'ensemble des partenaires<sup>2</sup>, avec le soutien de L'Union européenne (FEDER), de l'État (via l'ADEME) et de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Nous allons entrer dans la phase de traitement des autorisations administratives puis de construction, sur le site Innovex de Fos-sur-Mer, pour un démarrage opérationnel et de premières injections dans le réseau prévues en 2018. ♦

1 MW

PUISSANCE ÉLECTRIQUE.

130 TWh/an

CAPACITÉ DE STOCKAGE DANS LE RÉSEAU DE GAZ FRANÇAIS.

200 m<sup>3</sup>/h

INJECTION D'HYDROGÈNE.

25 m<sup>3</sup>/h

INJECTION DE MÉTHANE.

#### Note :

<sup>2</sup>. GRTgaz, avec Atmosat, CEA, CNR, Leroux et Lotz Technologies, McPhy Energy, TIGF, Grand Port Maritime de Marseille.

WWW

jupiter1000.fr  
grtgaz.com  
cea-tech.fr  
ademe.fr

Événement

## Entreprendre au CEA ? C'est possible !



113 participants, 44 rendez-vous personnalisés avec 11 experts.

6<sup>e</sup> édition de la journée « Création d'entreprise » organisée par le CEA en Ile-de-France<sup>1</sup>. L'occasion pour l'organisme d'illustrer sa contribution à la réindustrialisation de la France, via notamment les transferts technologiques. Temps fort de la journée : les témoignages de dirigeants de 5 start-up issues de technologies du CEA (Posithôt, Genel, TheraNexus, Tridimeo et WinMS). Parcours, anecdotes et émotions ont été partagés autour d'une table ronde suivie, pour qui le souhaitait, de rendez-vous personnalisés avec des experts de la création d'entreprise. Objectifs : promouvoir l'entrepreneuriat, la culture du risque, de la réussite et de l'échec. « *Le CEA met en place des dispositifs conséquents pour nous guider, nous former et nous accompagner dans l'aventure* » précise Marc Olivas, Directeur de WinMS. Cette politique de valorisation et d'essai au CEA a d'ailleurs été présentée au cours de cet événement, ainsi que les dispositifs et modalités de financement à disposition des chercheurs-entrepreneurs. À ce jour, 185 entreprises ont été créées à partir de technologies du CEA, produisant près de 4 000 emplois directs.

Note :  
1. 17<sup>e</sup> en France, entre autres sur les sites de Grenoble et de Cadarache.

185

ENTREPRISES CRÉÉES À PARTIR  
DES TECHNOLOGIES DU CEA

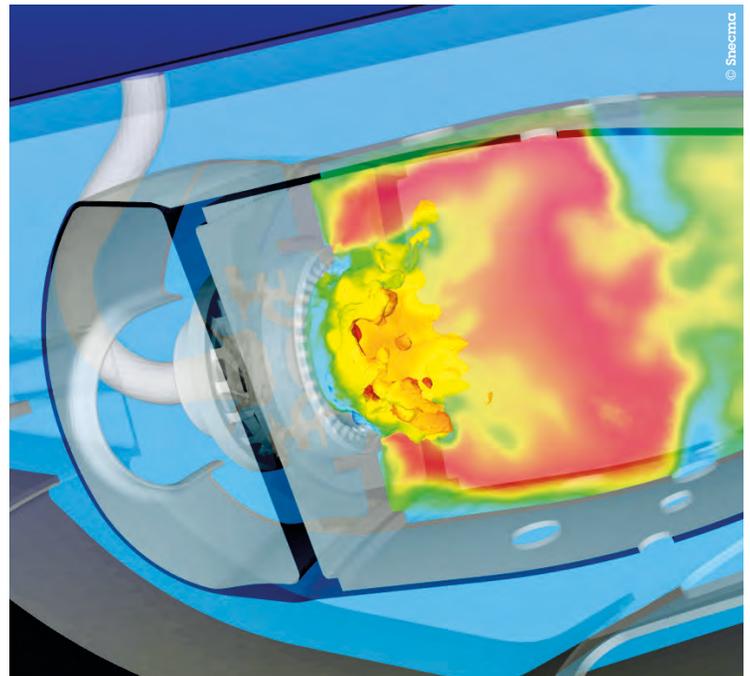
## EN 2016, OFFREZ UN ROBOT À VOTRE ENTREPRISE !

Avis aux dirigeants qui souhaitent passer le cap de la robotisation collaborative ! Une quarantaine d'entreprises peut encore profiter du programme ROBOT Start PME avant le 31 mai 2016. Lancé en 2013, dans le cadre du plan national pour la robotique « France Robots Initiatives », ROBOT Start PME apporte un soutien aux PME primo-accédantes à la robotisation : accompagnement expert (diagnostic, étude de faisabilité, définition du projet, suivi) ; aide financière à hauteur de 10 % de l'investissement (sous réserve des fonds disponibles).

À ce jour, plus de 200 entreprises ont bénéficié du dispositif mis en œuvre par le SYMOP, le CETIM et le CEA. À la clé : un nouvel élan pour leur compétitivité et leur croissance et l'amélioration des conditions de travail des collaborateurs (diminution de la pénibilité, montée en compétences, esprit d'équipe...).

Investissement

## Toujours plus de calcul haute performance



1,4 pétaflops de puissance de calcul et 2,5 Po<sup>3</sup> de capacité de stockage en mode privé avec un débit de 60 GO/s. Voici les mensurations de la nouvelle acquisition du CEA pour son centre de calcul recherche et technologie (CCRT). Le supercalculateur COBALT, conçu par Bull Atos Technologies, sera trois fois plus puissant que le calculateur actuel du CCRT avec trois fois plus d'efficacité énergétique. De quoi satisfaire, dès mi-2016, les besoins croissants en calcul haute performance des treize partenaires<sup>1</sup> du CCRT.

Note :  
1. Airbus D&S, Areva, EDF, Herakles, Ineris, L'Oréal, Saran Tech, Snecma, Thales, Thales Alenia Space, Techspace Aero, Turbomeca, Valeo.

Formation

## Partenariat du CEA et de l'École des Mines autour du démantèlement

Dans le cadre du Pôle de valorisation des sites industriels (PVSI), le CEA de Marcoule et l'École des Mines d'Alès signent une convention de formation aux technologies pour le démantèlement. Portant sur une durée de trois ans, la convention encadre l'apport d'équipements par le CEA, dont le robot RICA développé avec la société Cyberia, pour la plateforme mécatronique de l'école. Ainsi, les étudiants pourront manier les engins *ad hoc* dans le cadre d'applications concrètes et représentatives d'opérations de démantèlement. Une première promotion d'apprentis est déjà en place, et d'autres suivront. Objectif : former des étudiants au travers de missions d'études et sensibiliser les futurs ingénieurs aux enjeux et aux perspectives liés au démantèlement nucléaire.



Signature de la convention de formation.



Collaboration

## Bureau Veritas et le CEA renforcent la fiabilité et la performance des logiciels embarqués



Optimiser le développement et l'évaluation des logiciels embarqués, voici tout l'objet du guide co-écrit par l'institut List de CEA Tech et Bureau Veritas, leader mondial dans l'évaluation de la conformité et de la certification. Diffusé en accès libre, *Software guidelines - Development & Assessment* établit un nouveau standard pour renforcer et vérifier la fiabilité des logiciels. Et garantir leur double performance, à savoir opérabilité optimale et haute tolérance aux risques. Dans cette optique, le guide renferme plus de 60 exigences fixées à partir de normes existantes : IEC 61508, IEC 62304, DO-178... Bureau Veritas s'est par ailleurs appuyé sur la plateforme d'analyse de code Frama-C du List pour permettre aux développeurs de vérifier l'absence de failles logicielles majeures. Le guide s'adresse à tous les domaines qui ne disposent pas d'une norme sectorielle imposée (robotique et objets connectés, machines industrielles et agricoles...) mais souhaitent obtenir, après évaluation, une attestation de conformité de leurs logiciels embarqués.

60  
EXIGENCES FIXÉES  
À PARTIR DE NORMES  
EXISTANTES

Procédés

# Assembler deux matériaux impossibles... à assembler!

Passé maître dans l'art d'associer des matériaux incompatibles, l'institut **Liten/CEA Tech** adapte son protocole pour la réalisation d'une pièce complexe du projet allemand d'accélérateur Fair. Un savoir-faire sur-mesure qui fait des émules. *par Mathieu Grousson*

© V. Gully/CEA

**Par un travail d'optimisation, deux matériaux a priori incompatibles peuvent être contraints de s'assembler.**

Olivier Lemaire de l'institut Liten de CEA Tech



Outil de diagnostic (en forme de cône) associant cuivre et tungstène.

**A**ssembler du tungstène et du cuivre ? Tout spécialiste des matériaux vous le dira, c'est simplement infaisable. Incompatibles, ces deux métaux sont impossibles à souder par les techniques classiques. C'est pourtant ce qu'ont réussi à faire des chercheurs du Liten, dans le cadre de la réalisation d'un outil de diagnostic pour l'accélérateur Fair de GSI<sup>1</sup>.

« Pour que notre dispositif résiste aux rayonnements du faisceau de Fair (100 mA de protons à une énergie de 95 keV), nous avons imaginé un cône en tungstène (qui arrête la chaleur) et en cuivre (qui la dissipe vers un fluide circulant à l'extérieur). Nous avons confié la réalisation de cet assemblage complexe au Liten qui nous suit depuis des années dans de nombreux projets, que cela soit pour notre R&D ou nos contributions aux Très grands instruments de recherche (TGIR) » indique Patrick Girardot de l'institut Irfu de CEA Sciences.

## Un mariage forcé par la température et la pression

Les chercheurs du Liten ont alors eu recours à un procédé que seuls une poignée de laboratoires et de rares industriels maîtrisent : l'assemblage par « **soudage diffusion** ». Son principe est d'appliquer, selon un cycle prédéfini, une température et une pression pouvant aller jusqu'à 1 500 °C et 1 500 bars afin de forcer la diffusion des atomes d'un des matériaux dans l'autre, et réciproquement. « Par un travail d'optimisation, deux matériaux a priori incompatibles peuvent ainsi être contraints de s'assembler l'un avec l'autre. Dans le cas du cône nous avons notamment introduit un matériau intermédiaire pour assurer la jonction du tungstène avec le cuivre », explique Olivier Lemaire, du Liten. In fine, les chercheurs ont enrichi leur protocole pour positionner, assembler et coller des pièces géométriquement complexes et aux propriétés physico-chimiques hétérogènes. « Les principes du procédé sont connus, mais chaque réalisation est unique », précise le spécialiste dont l'équipe dispense son expertise de l'aéronautique au nucléaire, notamment dans le domaine de la fusion avec l'ITER, en passant par la plasturgie et la verrerie. ♦

Note :  
1. Laboratoire de recherche allemand en physique nucléaire.

## Soudage diffusion

Méthode de « compression isostatique à chaud » (Hot Isostatic Pressure - HIP).

Microélectronique

# Attention, ça va « moins » chauffer!

Alors que l'efficacité énergétique est au cœur de nombreuses recherches, une équipe de l'institut **Leti/CEA Tech** parvient à améliorer le rendement des convertisseurs électriques en intégrant du nitrure de gallium dans les transistors de puissance. *par Amélie Lorec*

**S**ans conversion de l'électricité en différents niveaux de tension et de courant, il serait impossible d'utiliser bon nombre d'objets du quotidien (électroménager, téléphone portable, voiture électrique...). Or, cette étape, opérée par des convertisseurs contenant principalement des composants de puissance en silicium, entraîne des pertes énergétiques sous forme de chaleur. « *Le rendement des convertisseurs impacte directement l'efficacité énergétique des Datacenters par exemple, alors que ceux-ci consomment près de 2 à 3 % de l'électricité produite dans le monde* » explique Marc Plissonnier, chef de laboratoire à l'institut Leti de CEA Tech.

## Une seconde peau de nitrure de gallium

Une solution pour améliorer le rendement de ces dispositifs consiste à fabriquer des transistors de puissance à partir de matériaux dits « grand gap », tels que le carbure de silicium et le nitrure de gallium (GaN). Ceux-ci ont un rendement de conversion bien supérieur à celui du silicium. Avec, toutefois, un inconvénient de taille : leur prix ! Une équipe du Leti a trouvé comment contourner ce problème en

utilisant à la fois du silicium et du GaN : « *nous avons développé un procédé pour recouvrir un substrat de silicium de 200 mm de diamètre d'une très fine couche uniforme de GaN par dépôt chimique en phase vapeur. Ce dépôt de GaN sur un matériau ayant des caractéristiques cristallines bien différentes a été l'un des principaux enjeux à surmonter. Ensuite, les transistors de puissance ont été fabriqués avec les technologies conventionnelles de la microélectronique* » explique le chercheur. Double gain à la clé : moins de GaN utilisé, tout en conservant une bonne tenue en tension ; pas d'investissements pour de nouvelles installations.

Une autre innovation a permis que le transistor GaN soit naturellement bloqué. « *En effet, par défaut, cette technologie est passante, c'est-à-dire que le courant circule en permanence. Ce qui n'est pas standard par rapport aux composants de puissance actuels*, précise Marc Plissonnier. Là, nous avons modifié l'architecture du composant afin qu'il soit naturellement bloqué et qu'il agisse comme un interrupteur. » Aujourd'hui, le transistor présente une tenue en tension à 650 V. Prochain objectif : 1200 V.

En plus de diminuer la perte d'énergie, les transistors au GaN permettent de développer des convertisseurs moins lourds et plus compacts, qui pourraient être directement intégrés dans l'application. Aussi, ceux du Leti font-ils déjà l'objet d'usages concrets, notamment dans le secteur des moteurs électriques et de l'automobile. ♦



## Intelligence artificielle

Un processeur au Q.I  
supérieur à la normale

Il traite 5 000 images par seconde tout en consommant cinq fois moins d'énergie qu'un processeur standard. Ce prototype, développé par l'institut **List/CEA Tech** pour GlobalSensing Technologies, ouvre grand la porte du **deep learning**, grâce à sa maîtrise de l'exécution optimisée des « **réseaux de neurones** ».

par Mathieu Grousson

**Deep learning**  
(apprentissage profond)  
Ensemble de méthodes d'apprentissage automatique permettant de définir une suite de transformations de données d'entrée (images signaux...) pour faciliter leur interprétation.

**Réseaux de neurones**  
Algorithme ou modèle de calcul dont la conception s'inspire d'un modèle simplifié du fonctionnement des neurones biologiques.

- Notes :
1. Field Programmable Gate Array.
  2. Fully Depleted Silicon on Insulator.

Depuis quelques années, les algorithmes « réseaux de neurones » font des merveilles dans des applications de reconnaissance, par exemple de visages, de sons ou de tout autre signal issu d'un ensemble de capteurs. Ils peuvent reconnaître des situations et des contextes et agir en conséquence, dans des domaines aussi variés que l'agroalimentaire, la vidéosurveillance ou l'industrie. Utilisables sur tout type de processeurs, ces algorithmes doués de remarquables capacités d'apprentissage sont très gourmands en calcul. Ce qui pose des questions d'encombrement et de consommation pour des applications embarquées...

C'est tout l'enjeu du prototype proposé par l'institut List de CEA Tech pour répondre aux besoins de la start-up GlobalSensing Technologies (GST). Il prend la forme d'une architecture générique massivement parallèle, composée d'unités de calcul les plus petites possible et à très faible

consommation ; le tout taillé sur mesure pour la réalisation des très nombreuses opérations nécessaires à la mise en œuvre d'un réseau de neurones.

## Plus performant et moins gourmand en énergie

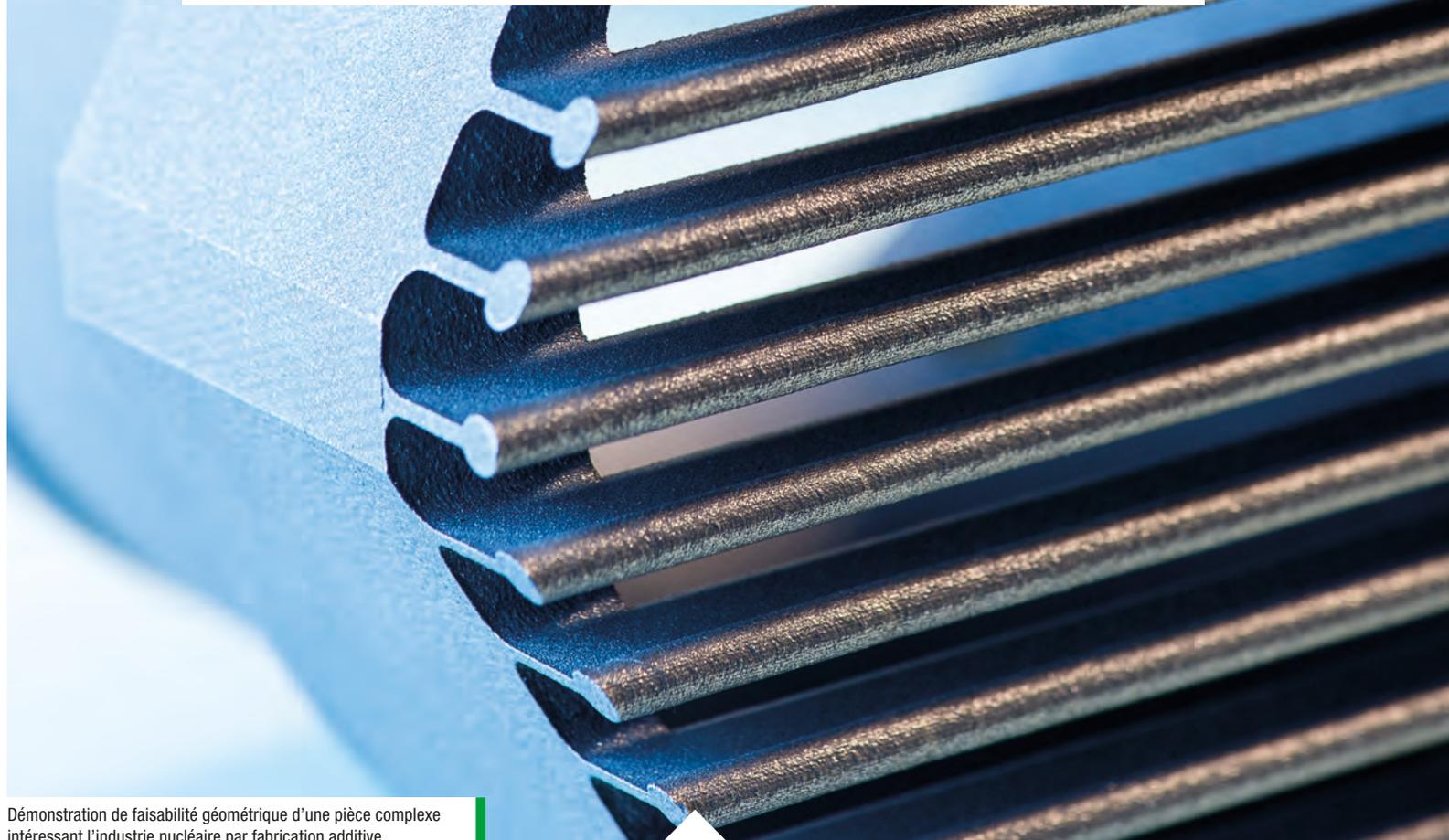
« Les performances de ce processeur ont été validées par simulation numérique, puis il a été implémenté sur une architecture FPGA<sup>1</sup> pour laquelle une application a été développée en se basant sur la plateforme N2-D2 du List » indique Jean-Marc Philippe, ingénieur du List. Le résultat est à la hauteur : traitement de 5 000 images par seconde, même avec une petite configuration, alors qu'un processeur de smartphone haut de gamme plafonne à 800 ; et gain de 5 à 6 en efficacité énergétique pour la mise en œuvre d'un réseau de neurones par rapport au cas où ce dernier est exécuté sur un processeur standard. Un test comparatif a notamment été présenté au salon international *Embedded World 2016*, organisé à Nuremberg en février dernier.

« GST prévoit une commercialisation dès cette année », précise Jean-Marc Philippe. Et, preuve du succès de ce partenariat, le List et la start-up envisagent de prolonger leur laboratoire commun pour une nouvelle durée de trois ans. Pour les chercheurs, il s'agit désormais de décliner cette architecture novatrice sur un circuit dédié. Précisément, un circuit fondé sur la technologie FDSOI<sup>2</sup> de l'institut Leti de CEA Tech qui offre la possibilité d'adapter au plus fin la consommation des circuits en fonction des opérations à réaliser. « Ainsi, nous pensons atteindre un gain en efficacité énergétique supplémentaire de 50 », indique Alexandre Carbon, ingénieur du List. De quoi booster comme jamais les performances des réseaux de neurones ! ♦



Elle libère le design de pièces complexes, accélère les prototypages, confère de nouvelles propriétés aux objets, économise les matières premières... Le recours à la fabrication additive, connue sous le nom d'impression 3D, est en passe de devenir incontournable dans de nombreux secteurs. Une innovation qui intéresse forcément le CEA...

par Fabrice Demarthon



Démonstration de faisabilité géométrique d'une pièce complexe intéressant l'industrie nucléaire par fabrication additive.

## La fabrication **additive**

**F**abriquer n'importe quel objet à partir d'une simple image numérique : c'est la promesse des imprimantes 3D qui connaissent aujourd'hui un véritable engouement. Le célèbre fabricant de jouets Mattel vient même d'annoncer la commercialisation prochaine d'une telle machine pour les enfants ! Le CEA aussi s'intéresse très sérieusement à ces machines, et plus largement au principe mis en œuvre : la fabrication additive. « *La fabrication additive consiste à créer un objet couche par couche, à partir d'un modèle réalisé par ordinateur*, explique Frédéric Schuster, directeur du Programme transversal du CEA Matériaux Avancés. *Elle s'oppose aux méthodes traditionnelles, dites soustractives, qui permettent de façonner une pièce dans un bloc de matière.* » Aussi le CEA a-t-il engagé une réflexion de fond sur les opportunités offertes par la fabrication additive dans ses domaines de recherche. Un premier réseau de machines d'impression 3D a d'ores

et déjà été mis en place avec, à la clé, l'idée de maîtriser toute la chaîne de fabrication, de l'élaboration des matières premières à la finalisation des pièces, tout en levant les verrous technologiques les plus importants. Des équipes cherchent parallèlement à comprendre les phénomènes physiques mis en jeu par les différentes techniques utilisées dont la **stéréolithographie**, la **fusion sélective par laser**, ou, plus connue, l'impression jet d'encre...

### Ouvrir le champ des possibles

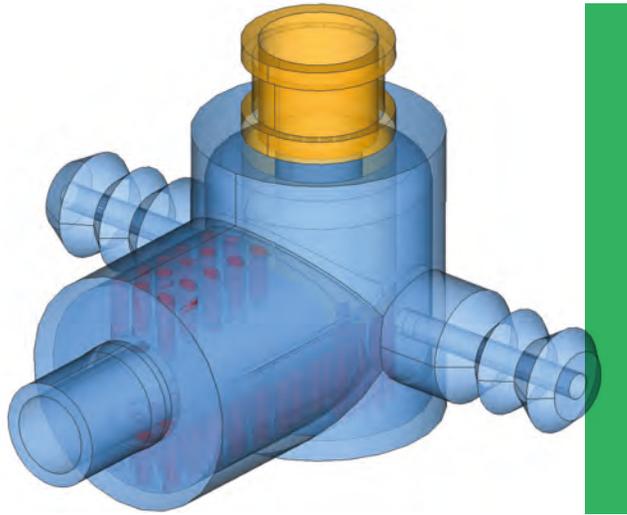
Pourquoi la fabrication additive suscite-t-elle autant d'intérêt ? « *Premier avantage, et non des moindres : la liberté de conception*, répond Frédéric Schuster. *L'usinage par enlèvement de matière ne peut pas tout faire. Il est en effet beaucoup plus difficile de faire une pièce creuse d'un seul tenant que de la fabriquer à partir de plus petits morceaux à assembler. La fabrication additive, elle, s'affranchit des contraintes de l'usinage et permet l'accès à des* ♦♦♦

### Stereo-lithographie

Construction à l'aide d'un laser ultraviolet qui frappe un bain de résine pour le polymériser aux endroits voulus.

### Fusion sélective par laser

Interaction d'un laser puissant avec une poudre de métal ou du plastique dont les particules fusionnent ou s'agglomèrent, formant ainsi la pièce.



Modèle CAO et pièce réalisée en stéréolithographie pour les besoins de l'Iramis.

*géométries très complexes, des sphères imbriquées les unes dans les autres par exemple. » À cet élargissement des possibles en matière de géométrie s'ajoute celui des propriétés physico-chimiques. Les pièces étant conçues couche par couche, il est possible d'attribuer à l'une d'elle certaines propriétés et d'autres à sa voisine. « On peut ainsi obtenir un gradient de propriétés tant en surface qu'en volume, précise Frédéric Schuster. La fabrication additive ouvre également la voie à une nouvelle métallurgie, dans la mesure où l'on peut contrôler les microstructures des pièces façonnées. » Enfin, les technologies d'impression 3D pourraient permettre, en théorie, d'économiser les ressources en matières premières, dans la mesure où elles évitent l'accumulation des chutes de matériaux, inévitables lorsqu'une pièce est usinée de façon soustractive à partir d'un plus gros bloc. « À condition qu'on puisse recycler les poudres, tient cependant à tempérer Frédéric Schuster. Or, certaines technologies ne le permettent pas car, durant le processus de fabrication, elles ont un impact sur la qualité des poudres utilisées qui empêche leur réutilisation. »*

### Un nouvel outil pour les scientifiques

Forte de tous ces avantages, la fabrication additive est, depuis sa naissance, la méthode privilégiée pour le prototypage : une simple imprimante 3D permet de donner réalité à une idée, en seulement quelques heures et à moindres frais. Mais elle peut aussi servir à fabriquer complètement des pièces de routine. Les chercheurs du laboratoire Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie (Nimbe<sup>1</sup>) à Saclay, l'ont bien compris. « Spécialistes de la nanochimie, nous avons commencé par imprimer nos modèles de molécules et nos supports d'échantillons, se souvient Olivier Taché, chercheur de l'Institut Iramis du CEA. Aujourd'hui, nous utilisons les imprimantes 3D pour améliorer des instruments de chimie analytique, notamment pour l'étude des nanoparticules. » Grâce à ces machines (le laboratoire en possède trois), les scientifiques ont pu améliorer leur spectrographe en

remplaçant l'une de ses pièces par une autre de leur cru. « Nous avons développé des chambres de nébulisation qui, dans certains domaines, surclassent celles en verre qu'on trouve dans le commerce. L'impression 3D n'est pas qu'une méthode de prototypage, c'est aussi un nouvel outil pour les scientifiques. »

Si les imprimantes 3D ont une belle place à prendre dans les laboratoires de recherche fondamentale, qu'en est-il dans les autres champs d'investigation du CEA ? « La phase d'évaluation de ces techniques est plus ou moins avancée selon les domaines » indique Frédéric Schuster. En microélectronique, des travaux débutent à l'institut Leti de CEA Tech. Pour les énergies renouvelables, des prototypes de batteries et de cœurs de pile à combustible ont été développés et sont en cours de test. Dans le domaine de la santé, une équipe de l'Iramis conçoit à façon des circuits microfluidiques pour l'imagerie IRM et des biocapteurs intégrés, permettant d'envisager la réalisation de dispositifs bas coût pour la médecine personnalisée. Concernant la R&D sur les matériaux utilisés et les procédés d'impression, à l'œuvre à l'institut Liten de CEA Tech, elle fait par exemple l'objet d'un partenariat avec la société Prodways pour développer et optimiser les procédés dédiés à des applications biomédicales et industrielles.

### Un intérêt potentiel pour le nucléaire

« Nous étudions aussi les avantages que pourrait offrir la fabrication additive dans le nucléaire », indique Philippe Prené, chef de programme au CEA-Den. Sur le papier, les perspectives sont prometteuses tant la fabrication additive pourrait répondre à certaines difficultés rencontrées dans l'industrie nucléaire. « Les réacteurs de demain devront être les plus efficaces possible au moindre coût, explique Philippe Prené. Or pour fabriquer certaines pièces aujourd'hui, la fabrication soustractive enlève 70 % voire 90 % de la masse de matériau de base ! Et certains alliages coûtent très cher. La fabrication additive pourrait diviser la quantité de matière utilisée par cinq. » Autre

Note :  
1. Unité mixte de recherche CEA/CNRS

avantage : la pérennité des modèles de conception. La chaîne de fabrication étant entièrement numérisée, les caractéristiques des pièces peuvent être facilement archivées et retrouvées en cas de besoin. Inutile alors de stocker des moules, qui valent parfois plus cher que les pièces elles-mêmes ! Pour une industrie qui compte la durée de vie de ses produits en décennies, l'argument est de poids. Reste que cette industrie est aussi soumise à de très rigoureux contrôles : on ne change pas de méthode de fabrication sans prouver que les nouvelles pièces seront aussi fiables que les anciennes. « *La qualification des matériaux, notamment des poudres métalliques et des pièces qui en résultent est une condition sine qua non pour que la fabrication additive puisse être adoptée par les industriels*, précise ainsi Philippe Prené. *Encore faudra-t-il intégrer l'utilisation de la fabrication additive dans les règles de conception et de dimensionnement des réacteurs, démontrer aux autorités de sûreté que les composants élaborés par ce procédé répondent aux spécifications requises.* »

### Un procédé sous haute surveillance

La qualité et les performances des pièces issues de la fabrication additive restent en effet un épineux problème. Il faut pouvoir prouver que la porosité d'un matériau fait à partir d'une poudre reste maîtrisée, et que le processus d'élaboration n'affecte pas les propriétés d'usage. « *En amont, nous avons mis en place une plateforme de traitement des poudres à Orléans*, indique Frédéric Schuster. *En aval, le CEA dispose de fortes compétences dans le*

## Les instituts Carnot en renfort des PME

Favoriser l'intégration de la fabrication additive dans les PME. C'est l'objectif de la filière Carnot Industries mécaniques et procédés (IMP), qui rassemble notamment les instituts Carnot de CEA Tech (List et Leti) et le Cetim. Elle dispose de compétences et moyens complémentaires : 1 bureau d'études produit, 1 plateforme de développement de poudres et de nanopoudres, 4 machines de fabrication additive, 5 plateaux de métallurgie et de caractérisation, 2 cellules d'usinage, 4 plateformes de contrôle non destructif et d'essais de caractérisation.

Forts de leurs relations privilégiées avec les fournisseurs d'équipements et d'un réseau de représentants dans les régions (5 antennes CEA Tech, 16 délégations du Cetim), les acteurs de la filière conduisent aussi un programme de R&D multipartenaires pour contribuer à la compétitivité des fabricants de machines de production, de contrôle et de caractérisation, ainsi que des fournisseurs de matières et des utilisateurs.

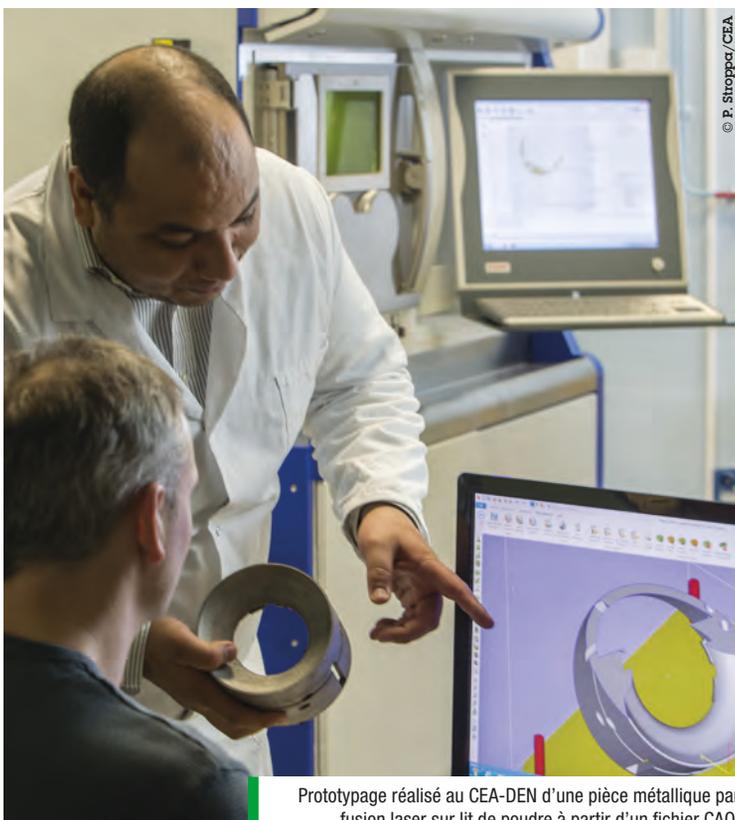
*contrôle non destructif et le monitoring des procédés.* »

Ainsi, les spécialistes de l'institut List de CEA Tech mettent au point des techniques de contrôle qualité adaptées à la fabrication additive. Les algorithmes de reconstruction d'images acquises par tomographie ou radiographie X sont améliorés afin de prendre en compte la complexité tridimensionnelle des pièces. Une technique par ultrasons induits par laser (une source laser génère des ultrasons qui interagissent avec les défauts ou hétérogénéités au sein de la pièce) est en cours de développement dans le cadre du projet I-AM-sure<sup>2</sup>, en collaboration avec d'autres laboratoires et différents industriels, dont le fabricant français d'imprimantes 3D Beam. « *L'objectif est d'intégrer les méthodes de contrôle non destructif aux machines de fabrication*, explique Steve Mahaut, chef de laboratoire au List. *La machine sera alors asservie au diagnostic et les défauts pourront être corrigés en temps réel.* »

S'assurer de la qualité des pièces issues de l'impression 3D s'avérera d'autant plus primordial que la technologie envahira des domaines de plus en plus variés et permettra de fabriquer, non plus des prototypes ou de petites pièces, mais des éléments de structure sur lesquels reposeront des constructions entières. C'est ainsi que CEA Tech, via sa plateforme régionale de transfert technologique de Lorraine, et le Cirtes<sup>3</sup>, inventeur du procédé de **stratoconception**, viennent de signer un accord technologique. Objet : étudier la faisabilité technique et industrielle de l'intégration de capteurs et de systèmes électroniques embarqués au cœur même des pièces. Cette approche permettrait non seulement de doter les pièces et structures de fonctionnalités intelligentes mais aussi d'assurer leur suivi en fonctionnement et d'en faciliter la maintenance. ♦

Notes :  
2. Inspection de pièces en Additive Manufacturing  
3. Centre européen de développement rapide de produit

**Stratoconception**  
Groupement d'atomes capable de détecter ou absorber l'énergie lumineuse (les pigments ou la chlorophylle par exemple).



Prototypage réalisé au CEA-DEN d'une pièce métallique par fusion laser sur lit de poudre à partir d'un fichier CAO.



Première bobine toroïdale, sous responsabilité du CEA, en cours de fabrication chez General Electric à Belfort.

Fusion nucléaire

# Pièces uniques pour tokamak nippon

P.14

La fusion  
nucléaire s'élargit  
au pays du  
Soleil-Levant

P.17

Fusion  
de compétences  
autour du JT60SA

Elle est arrivée à Saclay en décembre dernier et, le 12 février, elle a été la première à atteindre l'état supraconducteur à la station d'essais cryogéniques du CEA.

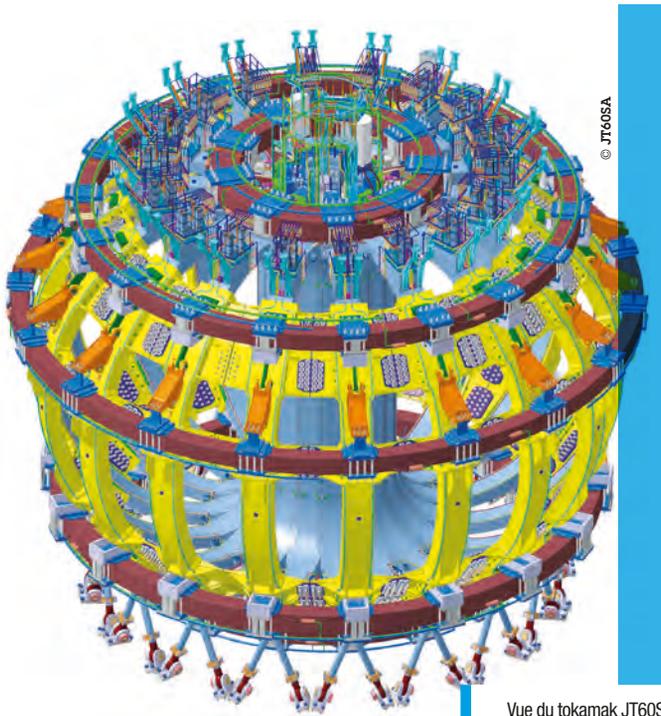
Il s'agit de l'une des 10 bobines qui sera expédiée par le CEA pour la réalisation du tokamak nippon JT60SA, dans le cadre du programme international « Approche élargie à Iter ». Enjeu : démontrer que la fusion nucléaire pourra, un jour, fournir en abondance de l'électricité.

Le défi technologique, sans précédent, bénéficie de l'expertise du CEA, tant scientifique, technique que dans la gestion de grands projets internationaux. Et ce, en collaboration avec des partenaires industriels qui profitent d'un cadre innovant exceptionnel.

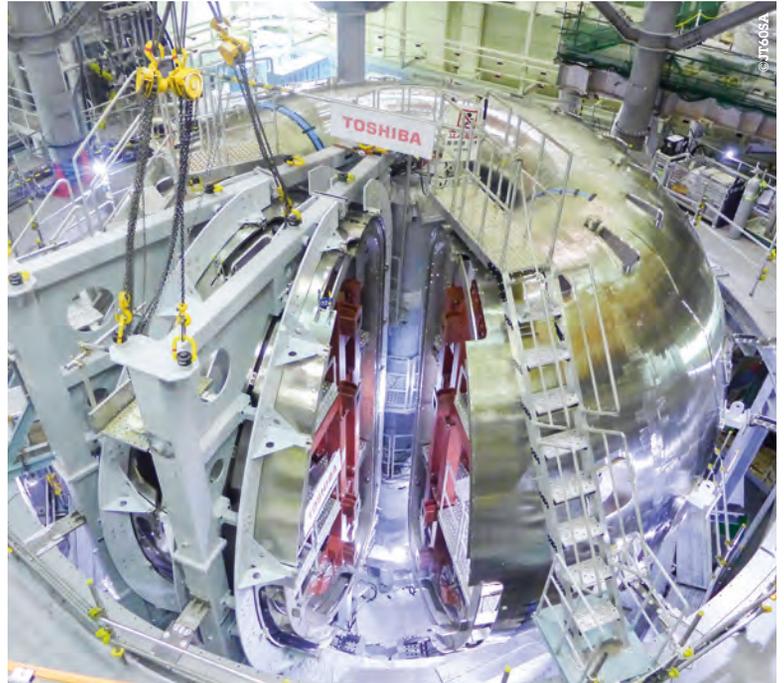
par Fabrice Demarthon

# La fusion nucléaire s'élargit au pays du Soleil-Levant

D'ici à ce que la construction du tokamak international Iter soit achevée à Cadarache, un autre réacteur aura vu le jour au Japon : le JT60SA. De dimension plus réduite, il s'inscrit dans l'Approche élargie, programme initié en 2005 pour accompagner le réacteur expérimental Iter et accélérer le développement d'un futur prototype de réacteur de fusion électrogène, Demo. À nouveau, le CEA fait partie de l'aventure.



© JT60SA



© JT60SA

Vue du tokamak JT60SA, avec les OIS (en jaune) qui maintiennent les bobines toroïdales, et les GS (voir p.18), notamment à la charge du CEA.

**M**aîtriser la puissance des étoiles... Un rêve fou? Pas aux yeux des chercheurs embarqués dans le gigantesque projet Iter<sup>1</sup> (le « chemin » en latin). Ce tokamak, en cours de construction à Cadarache dans le sud de la France, est le plus grand jamais imaginé. Il devra démontrer que la fusion nucléaire – réaction dont le Soleil tire son énergie – peut être contrôlée pour, un jour, fournir en abondance l'électricité dont l'humanité a grand besoin dans un processus durable et non proliférant. Mais c'est un long chemin qu'empruntent là les scientifiques. Initié en 1985, Iter, auquel

participent l'Union européenne, le Japon, les États-Unis, la Russie, la Chine, l'Inde et la Corée, n'a commencé à sortir de terre qu'en 2010. Et le planning de sa mise en service est en cours de consolidation.

## Un programme parallèle pour prendre en compte les avancées scientifiques

Entre-temps, un tokamak de dimension plus réduite, baptisé JT60SA, aura vu le jour au Japon. « Notre compréhension de la fusion contrôlée a évidemment progressé depuis les premières esquisses d'Iter dans les années 1980, indique Jean-Claude

Vallet, physicien du CEA et coordinateur technique pour la France du projet JT60SA. *En particulier, les expériences menées au milieu des années 1990 ont révélé des modes de confinement<sup>2</sup> du plasma dits "avancés", encore plus performants que ceux ayant servi de base pour dimensionner Iter.* » Et c'est pour prendre en compte ces avancées scientifiques que le programme « Approche élargie à Iter » a été lancé en 2005. « Cette année-là, en marge des négociations internationales sur le lieu d'implantation d'Iter, la communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) et le gouvernement

Notes :  
1. International Thermonuclear Experimental Reactor.  
2. Il existe diverses façons d'emprisonner le plasma dans le tokamak : le mode L (*low confinement*), le mode H (*high confinement*, celui d'Iter), et plusieurs autres dits avancés.

## Qu'est-ce qu'un tokamak?

Développé dans les années 1950 par des scientifiques soviétiques, le tokamak est une machine dans laquelle un mélange d'isotopes de l'hydrogène peut être porté à une température de l'ordre de 150 millions de degrés. Les noyaux atomiques peuvent alors fusionner les uns avec les autres, ce qui dégage une énergie considérable. Ce plasma est emprisonné (« confiné ») dans une enceinte à vide en forme de tore, grâce à de puissants champs magnétiques (de l'ordre de quelques teslas soit environ 100 000 fois le champ magnétique terrestre) produits par trois types de bobines magnétiques : toroïdales, poloïdales et un solénoïde central. L'énergie de la fusion des noyaux atomiques dégagée au sein du plasma est absorbée sous forme de chaleur par les parois du tore. Elle peut servir à générer de la vapeur et, grâce à des turbines et des alternateurs, produire de l'électricité. De tous les concepts de réacteur à fusion imaginés, le tokamak est à ce jour le plus prometteur.

japonais ont mis sur pied un programme de recherche commun pour préparer l'exploitation d'Iter et accélérer le développement d'un futur réacteur à fusion électrogène économiquement attractif, appelé Demo », relate Jean-Claude Vallet. Cette « approche élargie » porte sur trois grandes thématiques (matériaux, simulation, expérimentation) développées autour de trois projets implantés au Japon : Ibmif/Eveda, installation destinée à tester la résistance des matériaux aux neutrons ; Iferc, centre de recherche doté d'un puissant supercalculateur ; et JT60SA, tokamak pour l'étude de la physique des plasmas de fusion en général, et les fameux modes de confinement avancés, en particulier. « La participation à l'Approche élargie à Iter est basée sur le volontariat, indique René Gondé, directeur de projet au CEA. Les contributeurs sont la France (46 %), l'Italie (24 %), l'Espagne (12 %), l'Union européenne (12 %), la Belgique (3 %) et l'Allemagne (3 %), qui fournissent composants, services et main-d'œuvre pour chacun des trois projets. La coordination est assurée au niveau européen par l'Agence européenne pour Iter, Fusion For Energy (F4E). »

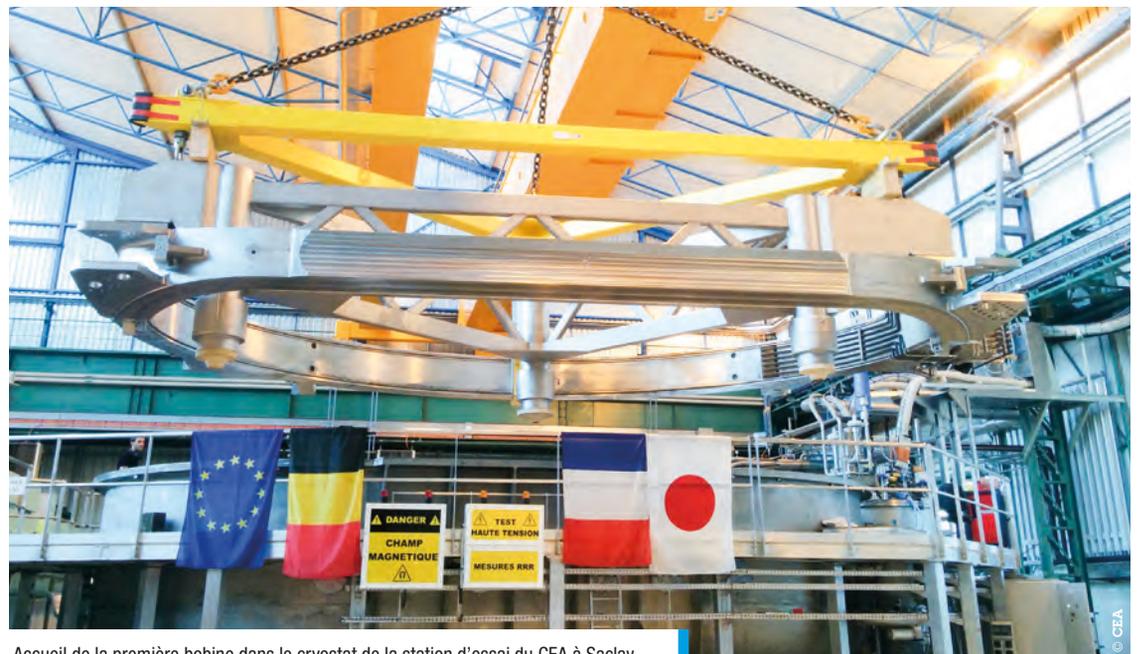
### Le CEA partie prenante

Fort de ses compétences dans le domaine de la fusion nucléaire, de la simulation numérique et des accélérateurs de particules, le CEA a été chargé de réaliser les engagements pris par la France dans le cadre de l'Approche élargie à Iter. Ils concernent notamment le tokamak JT60SA, qui sera construit à Naka à la place de la précédente machine

japonaise JT-60U dont il réutilisera une grande partie des infrastructures. Aussi le CEA doit-il fournir neuf des dix-huit bobines<sup>3</sup> de champ magnétique toroïdal (plus une bobine de rechange), la station d'essai de ces mêmes bobines, les structures mécaniques de support et de maintien du système de champ magnétique, l'usine cryogénique pour refroidir les bobines supraconductrices à des températures extrêmement basses, et cinq alimentations électriques. Une direction de projet dédiée, rattachée à l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM) du CEA, permet de fédérer les actions des trois instituts impliqués : l'IRFM, donc, mais aussi l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) et l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu). Elle s'appuie également sur de nombreux partenaires industriels, français et européens.

La mise en service de JT60SA est prévue en 2019. Et Jean-Claude Vallet de conclure : « Pour mesurer l'ampleur des défis représentés par la construction de cette machine, il suffit de mentionner que JT60SA sera pour près d'une décennie le plus puissant tokamak en fonctionnement dans le monde avant la montée en puissance du réacteur Iter à Cadarache. » ♦

**Note :**  
**3.** Les neuf autres bobines sont fournies par la société ASG, sous la conduite de l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement durable (ENEA).



Accueil de la première bobine dans le cryostat de la station d'essai du CEA à Saclay.

# Fusion de compétences autour du JT60SA

Bobines supraconductrices, station d'essais cryogéniques, structures mécaniques de maintien, usine de réfrigération, alimentations électriques: autant de prestations d'excellence que fournit le CEA avec des partenaires industriels pour contribuer au tokamak japonais JT60SA.

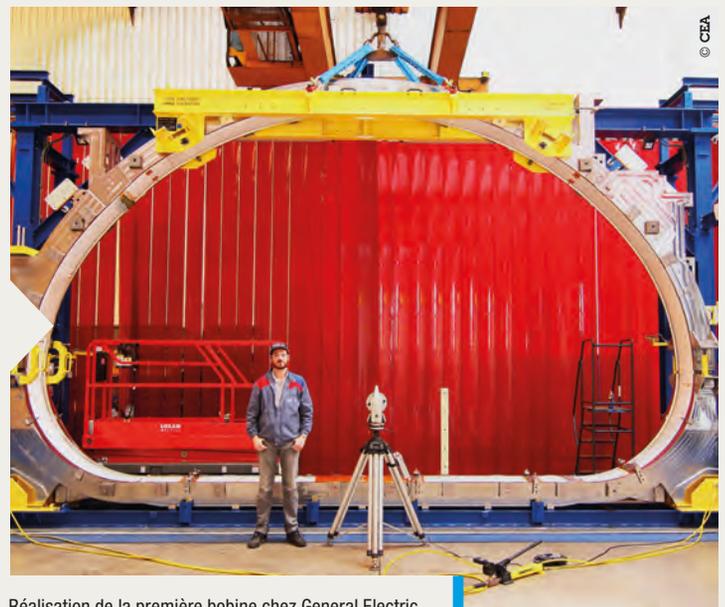
**C'**est un drôle de chaudron qui est installé dans le bâtiment 126 du CEA, à Saclay. Long de 11 m, large de 7 m, haut de 5 m et pesant 70 tonnes, l'ustensile ne sert pas à chauffer... mais à refroidir ! À l'intérieur, la première bobine toroïdale de JT60SA, arrivée sur place le 17 décembre 2015, subit encore une batterie de tests avant de partir pour le Japon. Les dix-sept autres recevront le même traitement au cours des mois qui viennent. « Dans le cadre de l'Approche élargie à Iter, le CEA a en charge l'étude et le suivi de réalisation de 9 des 18 bobines toroïdales du tokamak JT60SA, ainsi que la validation de l'ensemble de ces bobines, nécessitant la conception et réalisation de cette station d'essai cryogénique », explique Laurent Genini, responsable de la station, dont la pierre angulaire est le fameux « chaudron ». Il s'agit en fait d'un cryostat, fabriqué par les Ateliers de la Meuse en Belgique. Relié à un système de réfrigération par hélium et à une alimentation électrique capable de délivrer un courant de 25 700 ampères, le cryostat permet de vérifier le comportement de la bobine à une température de 4,5 kelvins (-268 °C). Pourquoi une température aussi basse ? Pour le comprendre, il faut

quitter brièvement Saclay et sa station d'essai pour rejoindre Belfort. C'est là, dans l'usine General Electric (anciennement Alstom), que sont fabriquées les dix bobines toroïdales « françaises » (neuf principales plus une de rechange) sous la conduite du CEA.

## Réaliser une partie du champ magnétique

« Pour confiner le plasma de fusion à l'intérieur du tokamak, nous devons créer un champ magnétique très puissant et stable, explique Patrick Decool, chef de projet au CEA. Un tel champ ne peut être obtenu qu'en faisant passer un courant très intense dans une bobine. Mais pour que ce dernier passe sans encombre, il faut que la résistance du matériau soit nulle. Les bobines sont donc fabriquées dans un matériau dit supraconducteur. » Et pour atteindre la supraconduction (donc une résistance électrique nulle pour que le courant circule sans échauffement), l'alliage doit être refroidi à -268 °C (4,5 kelvins).

« Le CEA a établi les spécifications techniques détaillées des bobines toroïdales et a contractualisé leur fabrication avec Alstom/General Electric en 2011, relate Patrick Decool. Nous les avons accompagnés à chaque étape, afin d'identifier les points critiques. Pas moins de 13 maquettes ont ainsi été élaborées avant la mise en fabrication proprement dite. » Une nécessité, dans la mesure où ces dispositifs font appel aux technologies cryomagnétiques les plus avancées du moment et qu'une fois terminés, il est très difficile de les réparer. Chaque bobine, en forme de D de 7 m de haut, 4,5 m de large et pesant près de 15 tonnes, est constituée d'un enroulement de câble de niobium-titane (supraconducteur), à l'intérieur duquel peut circuler l'hélium réfrigérant. Ce bobinage est isolé avec du tissu de verre, qui est ensuite imprégné d'une résine. Après plusieurs tests électriques, il est placé et calé avec de la fibre de



Réalisation de la première bobine chez General Electric.

## Pièces uniques pour tokamak nippon

verre dans un boîtier en inox, fabriqué par l'entreprise italienne Water Tosto. Celui-ci est fermé par soudure puis rempli de résine qu'une chauffe à 140 °C permet de polymériser. « Ensuite, toutes les interfaces du boîtier (trous de fixation, embouts, etc.) sont usinées et la tuyauterie pour l'alimentation en hélium est posée, indique Patrick Decool. Une dernière série de tests est réalisée avant l'envoi de la bobine à la station d'essai de Saclay. » De la mise au point des maquettes à la livraison de la première bobine, il aura fallu quatre ans de travail aux équipes du CEA et de General Electric. Aujourd'hui, les neuf bobines restantes sont toutes en cours de fabrication, à des étapes différentes : l'usine de Belfort a été organisée en douze stations de travail allant du bobinage à la préparation de l'expédition, en passant par l'installation des connexions électriques, l'isolation, l'imprégnation, l'insertion dans le boîtier, etc.

### Garantir les marges de fonctionnement

« Une fois que la bobine arrive à la station d'essai de Saclay, nous vérifions son état général et réalisons quelques tests "à chaud", avant

d'entrer dans le vif du sujet ! » explique Laurent Genini. En effet, la bobine est ensuite placée dans le cryostat pour contrôler son fonctionnement. L'opération s'avère longue et délicate : le passage de la température ambiante (300 kelvins) à celle de fonctionnement (4,5 kelvins), grâce à une circulation d'hélium gazeux, dure à lui seul plus d'une semaine. Le courant de 25 700 ampères est alors injecté dans la bobine. « Puis, nous augmentons la température par paliers de 0,1 kelvin jusqu'à provoquer un **quench** de la bobine afin de connaître sa marge de fonctionnement en température », ajoute le spécialiste. Cette étape dure également une semaine. Sept jours supplémentaires sont ensuite nécessaires pour réchauffer la bobine et l'extraire du cryostat. Chaque bobine fera ainsi l'objet de plus d'une vingtaine de rapports de test, envoyés à l'organisation Fusion For Energy (F4E), qui pourra donner son feu vert pour la suite des opérations.

### Maintenir les bobines dans la boîte

Cette suite se déroule dans le bâtiment voisin de la station d'essai. Tandis que la première bobine toroïdale subit ses ultimes tests, c'est une

maquette à l'identique, en polystyrène, qui trône dans le grand hall. Là, doivent être montées les OIS (*Outer Intercoil Structures*), structures mécaniques qui vont soutenir les bobines et supporter les fortes contraintes qu'elles subissent. « Lors des **disruptions** du plasma, le champ poloïdal disparaît brutalement et les bobines se vrillent », indiquent Christophe Mayri et Gaël Disset, de l'Irfu. Les structures de maintien externes doivent reprendre ces efforts. » Chaque OIS a également pour mission d'isoler électriquement les bobines les unes des autres. Une gageure, quand on sait que toutes les pièces sont métalliques. Il a fallu toute l'inventivité des chercheurs pour imaginer un « sandwich d'inox » et de plaques isolantes capables de transférer les énormes efforts entre les OIS, le tout à très basse température. « Nous avons réalisé des traitements de surface spécifiques afin que le sandwich métal/isolant boulonné ne glisse pas, et que les efforts entre OIS soient transmis par friction », explique Gaël Disset. Et l'exploit ne s'arrête pas là : ces mêmes chercheurs doivent déployer des talents d'orfèvres pour positionner les 5,5 tonnes de l'OIS sur le boîtier de la bobine au millimètre près. La bobine sera alors prête à partir ♦♦♦

### Disruption

Apparition brutale d'instabilités magnéto-hydrodynamiques dans l'enceinte de confinement.

### Quench

Perte de l'état supraconducteur.



Arrivée à la station d'essais cryogéniques au CEA.



Installation dans le cryostat pour les essais.

Notes :

1. En cours de reconfiguration sur le centre CEA de Cadarache, dans le cadre du programme West d'Iter.

2. Installation de l'Inac dédiée à la gestion des charges pulsées au CEA de Grenoble.

pour le Japon, par bateau, avec d'autres systèmes mis au point par l'Irfu : les IIS (*Inner Intercoil Structures*) qui solidarisent les bobines entre elles, et les GS (*Gravity Supports*), pieds articulés en forme de V inversé qui soutiennent le système magnétique. Les équipes japonaises pourront alors installer les 18 bobines autour de l'enceinte à vide du tokamak et relier le tout à l'usine cryogénique et aux alimentations électriques, deux autres briques fournies par la France.

Installer toute la chaîne du froid

« Pour que les bobines supraconductrices de JT60SA atteignent la température de fonctionnement de 4,5 kelvins, il n'y a qu'un réfrigérant possible : l'hélium », explique Valérie Lamaison, de l'IRFM. Il a donc fallu construire, juste à côté de la machine JT60SA à Naka, une usine complète de réfrigération. Piloté par le CEA et confié à Air Liquide, le défi est en passe d'être relevé : les premiers tests

de l'usine cryogénique ont démarré fin 2015. « Lorsque vous appuyez sur le bouton d'un aérosol, un déodorant par exemple, vous sentez que le flacon se refroidit, décrit Valérie Lamaison. Le principe de l'usine cryogénique est globalement le même. » Une première machine comprime l'hélium à 16 bars, thermalisé à 20 °C, qui est alors dirigé vers une « boîte froide » sous vide. Là, il est détendu à travers des turbines tournant à plusieurs milliers de tours par seconde, entraînant une baisse de la température de l'hélium et sa transformation en liquide. Deux autres « boîtes froides », de 12 m de longueur et 4 m de diamètre, constituées d'échangeurs de chaleur et de capacités de stockage, gèrent la production et la régulation de l'hélium liquide. Ce fluide est ensuite envoyé vers les bobines du tokamak grâce à un système de cryodistribution. L'ensemble forme une boucle fermée : l'hélium est une denrée rare et chère qu'il faut économiser. La seconde boîte contient aussi un bain de 7 m<sup>3</sup> d'hélium, nécessaire pour absorber les pics de chaleur générés par le plasma et assurer ainsi la stabilité de l'ensemble du réfrigérateur. « L'expertise cryogénique acquise avec le tokamak Tore Supra<sup>1</sup> et la boucle d'essais Hélios<sup>2</sup> nous a permis, en synergie avec l'Institut Inac,

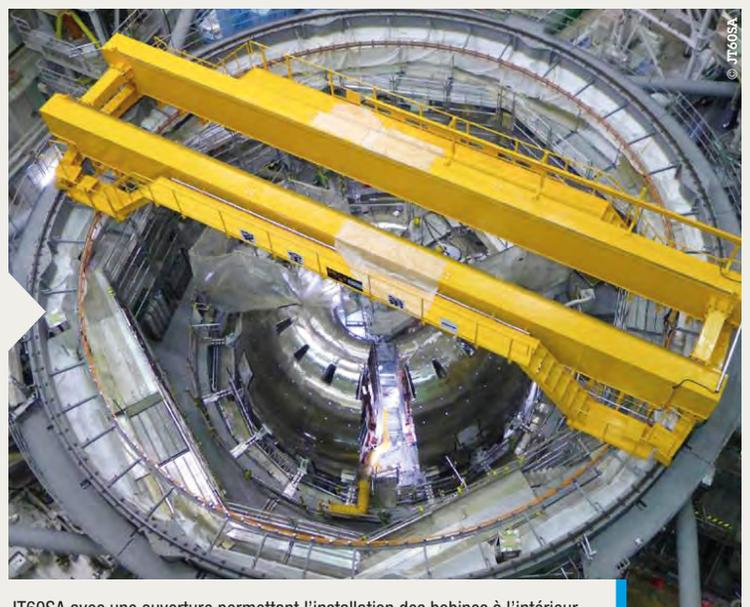
MARC NUSBAUM,

manager du projet de fabrication des bobines de JT60SA, Alstom/General Electric

**Notre plus grande satisfaction est d'avoir pu livrer, en décembre 2015 à Saclay, la première des 18 bobines du champ toroidal de JT60SA! C'est le résultat d'une véritable aventure scientifique et humaine, tant au sein de notre entreprise qu'avec les personnels du CEA. Ils ont en effet été très présents lors de la phase d'industrialisation pour trouver, avec nos équipes, les solutions répondant aux exigences requises ou aux difficultés rencontrées, par exemple sur la machine à bobiner. Certains outils mis au point pour ce contrat, comme le robot soudeur (des boîtiers de bobine, ndlr.), pourront même être utilisés dans d'autres domaines chez General Electric. Nos salariés sont fiers de travailler pour la fusion, un enjeu de société important.**



Montage d'une structure de maintien des bobines.



JT60SA avec une ouverture permettant l'installation des bobines à l'intérieur.

d'optimiser le système de réfrigération cryogénique de JT60SA, se félicite Valérie Lamaison. Nous avons réussi à réduire la dimension de l'usine – donc les coûts – tout en gardant la même efficacité, grâce notamment à la mise au point du bain d'hélium. » Grâce à lui, l'usine est seulement dimensionnée pour une puissance totale de 9 kW alors que les pics générés par le fonctionnement du tokamak peuvent atteindre 12 kW.

### Répondre aux besoins électriques

Une fois refroidies à 4,5 kelvins, les bobines du tokamak deviennent supraconductrices et peuvent supporter le courant très intense qui va y circuler afin de produire le champ magnétique nécessaire au confinement du plasma de fusion. Ce courant provient d'alimentations électriques spécifiques, dont cinq sont fournies par le CEA. « Les dix bobines de champ poloidal possèdent chacune leur alimentation électrique alors que les dix-huit bobines toroïdales sont alimentées par le même dispositif, explique Olivier Baulaigue, chef du projet au CEA. Nous sommes chargés de la mise au point de quatre alimentations poloidales et de l'unique alimentation toroïdale. » Des systèmes très différents, qui ont donné du fil à retordre aux chercheurs. Les alimentations poloidales doivent fournir un courant maximal de 20 000 ampères pour une tension de 1 000 volts. Jusque-là, rien qui ne sorte vraiment de l'ordinaire ; l'industrie sidérurgique utilise déjà de telles alimentations. Mais pour JT60SA, le courant doit pouvoir varier et changer de sens en une fraction de seconde, sans interruption. « Cette régulation rapide et en continu était un vrai défi technique », observe Olivier Baulaigue. Un défi que les scientifiques sont finalement parvenus à relever, à l'aide de leur partenaire industriel la société espagnole Jema Energy SA. De son côté, l'alimentation toroïdale, qui doit fournir un courant de 25 700 ampères pour une tension de seulement 80 volts, a été presque plus facile à mettre au point. Nul besoin d'un système de régulation

intelligent – elle est mise en route une seule fois en début de journée pour les expériences – mais un design particulier qui doit éviter toute surchauffe. « La sécurité a aussi été au cœur de nos préoccupations. L'énergie stockée dans les bobines du tokamak pendant son fonctionnement est de l'ordre du gigajoule. C'est l'équivalent d'un TGV lancé à pleine vitesse. Si le courant cessait soudainement de circuler, cette énergie se déploierait en arcs électriques, pouvant endommager les bobines et les alimentations électriques. Nous avons donc mis au point un système de contrôle rapide qui assure le bon fonctionnement des

alimentations et prend le relais, en quelques milliardièmes de seconde en cas d'incident. » Japon oblige, ce système de sécurité est aussi à l'épreuve des séismes. Les alimentations électriques, toujours en cours de fabrication dans les ateliers du constructeur, devraient être envoyées sur place en avril prochain pour leur installation. Fabrication et test des bobines toroïdales, pré-assemblage des structures de support, construction de l'usine cryogénique, fourniture des alimentations électriques... Les projets pilotés par le CEA doivent tous se terminer en 2017 afin de permettre le démarrage de JT60SA en 2019. ♦

### SUZANNE ROY,

vice-présidente du programme Iter, Air Liquide

**En tant que leader mondial des gaz, oxygène, azote, hydrogène et hélium sont au cœur du métier du groupe depuis sa création en 1902. Cette expertise cryogénique nous a ainsi permis de participer à de grands projets comme l'accélérateur LHC du Cern, le tokamak coréen Kstar, JT60SA ou Iter. Air Liquide est ainsi un collaborateur historique du CEA. Nos équipes ont une grande confiance les unes envers les autres, ce qui a facilité la mise au point des solutions pour relever le défi technologique du système très complexe de l'usine cryogénique de JT60SA. Notre filiale Air Liquide Japan a joué un rôle important dans ce projet. Grâce à elle, nous avons une bonne compréhension des standards et normes exigés par les autorités japonaises.**



Boîtes froides de l'usine cryogénique du JT60SA, conçues par Air Liquide, avec le CEA.

**CEA-DEN**

Direction de l'énergie nucléaire

**Inac/CEA Sciences**

Institut nanosciences et cryogénie

**Leti/CEA Tech**

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers



Boucle Omega, implantée à Grenoble.

**Thermohydraulique**

**Test de crise pour le combustible coréen**

Depuis plusieurs années, l'industriel coréen KEPCO NF s'appuie sur le savoir-faire de l'équipe du **CEA-DEN** en charge de l'installation Omega. À nouveau, les six campagnes initiées en 2012 pour tester la limite de transfert thermique d'assemblages de combustibles nucléaires s'achèvent avec succès. « *L'enjeu fut de déterminer les performances thermohydrauliques de nouveaux assemblages destinés aux réacteurs coréens, vis-à-vis de la "crise d'ébullition". Elle se manifeste par une dégradation brutale de l'échange de chaleur entre la gaine du combustible et le fluide caloporteur, pouvant entraîner un endommagement grave du combustible* » indique Thierry Forgeron du CEA-DEN, qui insiste sur la nécessité de mener des caractérisations expérimentales extensives pour prévenir ce risque. C'est là qu'intervient la boucle thermohydraulique Omega qui peut mobiliser une puissance maximale de 10 MW pour simuler, par effet Joule direct, la puissance nucléaire et les conditions thermohydrauliques rencontrées dans un réacteur de puissance. L'équipe a ainsi testé des prototypes (25 à 36 crayons combustibles à échelle 1) qu'ils ont eux-mêmes élaborés, assemblés et instrumentés, selon les spécifications de l'industriel. KEPCO NF considère désormais pouvoir présenter sa démarche de justification de sûreté à l'approbation de l'autorité coréenne compétente. L'industriel a également fait part de son intérêt à poursuivre cette collaboration avec le CEA, si des expérimentations complémentaires étaient requises. AG

**Low power**

**19,1 mW pour encoder une vidéo**

Le *low power* a le vent en poupe ! Car proposer des technologies basse consommation est un enjeu fort de la microélectronique. Une équipe de l'institut **Leti**, avec ses homologues du *Vietnam National University* (VNU), relèvent le défi. Ils proposent un encodeur vidéo H.264 qui affiche une consommation totale de 19,1 mW, contre 30 à 600 mW pour les produits du marché. Les développements se poursuivent pour améliorer ce gain.

*Mina News*

**Cryptographie quantique**

**85 % de collecte des photons uniques**

Les progrès se poursuivent dans la maîtrise des propriétés quantiques élémentaires des sources lumineuses. À ce titre, les détecteurs supraconducteurs de photons uniques (SSPD) conçus par l'institut **Inac**, avec la start-up néerlandaise Single Quantum et l'institut suédois KTH, fixent un nouvel état de l'art : 85 % de rendement de collecte des photons uniques, alors que les diodes silicium à avalanche (concurrentes) ne dépassent pas les 40 %. *Mina News*

**Radiofréquences**

**27,12 Mb/s de débit pour le passeport électronique**

Recevoir jusqu'à 27,12 Mb/s de données RFID, selon la norme ISO 14443-amd5 : voici les performances du lecteur et de l'ASIC (circuit intégré propre à une application) développés à l'institut **Leti**. De nombreuses applications bénéficieront de cette innovation, prochainement brevetée. Parmi elles, le passeport électronique de 4<sup>e</sup> génération qui stockera de plus en plus d'informations sécurisées comme les visas, enregistrés sur la puce. *Mina News*





### Maladie infectieuse

## Paludisme : les faux-semblants de l'artémisinine

La cible de l'artémisinine, l'un des médicaments les plus efficaces pour combattre le paludisme, n'est pas celle que l'on croit ! Jusqu'ici les différentes publications avançaient l'hypothèse que l'artémisinine conduisait à la mort du parasite en inhibant sa protéine ATPase-Ca<sup>2+</sup>, protéine qui permet le transport du calcium (messager de l'information cellulaire).

Or, des scientifiques de l'I2BC, en collaboration avec une équipe danoise, ont étudié son action dans la levure et les ovocytes de la grenouille Xénope. Résultats : aucun effet de l'artémisinine observé sur l'activité de l'ATPase-Ca<sup>2+</sup> dans l'un ou l'autre de ces modèles.

Ces travaux devraient donner une nouvelle orientation aux recherches sur le paludisme qui, en 2013, a causé un demi-million de décès pour environ 200 millions de cas, avec pour foyer principal l'Afrique, qui subit 90 % des décès. AL

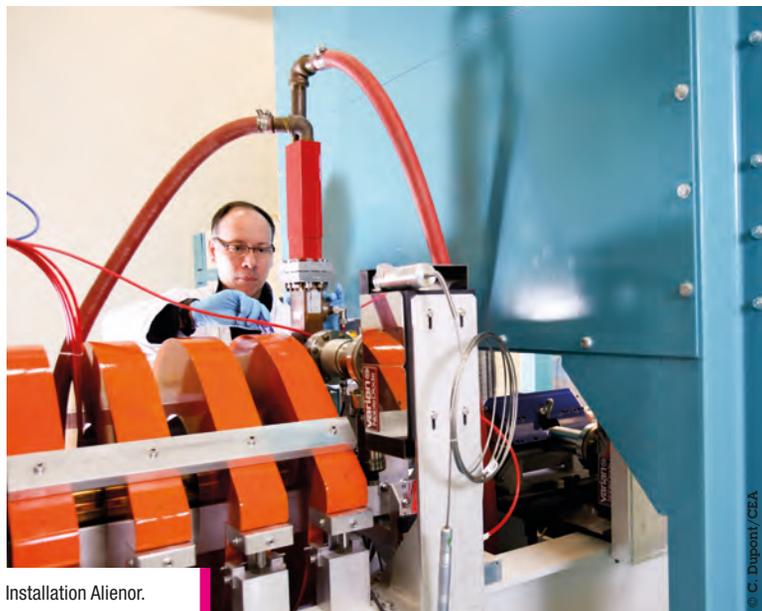
### Radiolyse

Décomposition chimique de la matière par des rayonnements ionisants.

### Stockage de l'énergie

## Longue vie aux batteries!

L'électrolyte détermine souvent la durée de vie d'une batterie. Or, les études de son vieillissement, cycles répétés et accélérés de charge/décharge, sont longues et coûteuses. Elles seront désormais beaucoup plus rapides et efficaces grâce à la radiolyse, alternative proposée par des chercheurs de l'Iramis sur leur installation Alienor, avec le soutien technique du CEA-DEN. Pour valider la simulation fidèle du vieillissement naturel des électrolytes avec leur méthode, ils ont comparé leur résultat avec un échantillon, fourni par le Liten, de batterie lithium-ion « vieille » avec les méthodes classiques. Autres avantages de la radiolyse : accès à des informations cinétiques ; suivi de l'évolution des composants de l'électrolyte ; modulation de l'énergie transmise à l'échantillon pour étudier finement les produits de dégradation. Cette perspective ouvre la voie à de nouvelles méthodes d'études, tel que le criblage par chimie sous rayonnement ionisant, pour sélectionner les meilleurs électrolytes et ainsi améliorer la durée de vie des accumulateurs du futur. AL



Installation Alienor.

© C. Dupont/CEA

### Énergie solaire

## Autodiagnostic des modules photovoltaïques!

Grâce aux développements de l'institut Liten, les modules photovoltaïques seront bientôt dotés de fonctions d'autodiagnostic avancées. Ils pourront ainsi détecter et identifier un défaut en un temps record, sans interrompre leur production d'énergie. Pour ce faire, les chercheurs ont conçu une carte électronique permettant d'isoler chaque module du reste de la chaîne de production et de tracer sa « courbe I-V » en moins d'1/1 000<sup>e</sup> de seconde. La carte est ensuite analysée pour y détecter les signatures électriques caractéristiques de différents types de défauts.

Ce système électronique, qui peut être intégré dès la conception ou ajouté aux modules existants, anticipe les normes européennes et suscite déjà l'intérêt des équipementiers. AL

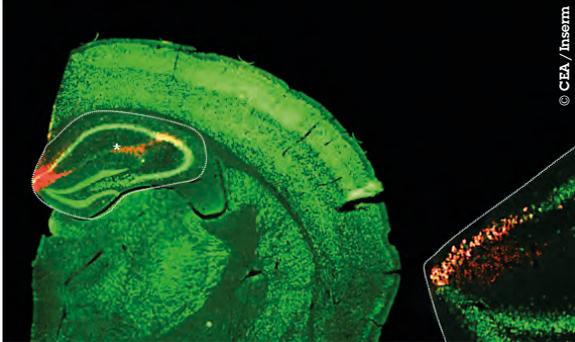
### Courbe I-V

Courbe courant/tension caractéristique de chaque élément.



© V. Gully/CEA

Maladie neurodégénérative



## Un mime pour les stades précoces d'Alzheimer

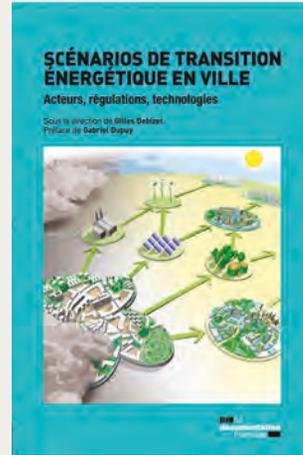
« Les actuels modèles animaux de la maladie d'Alzheimer peuvent être améliorés pour, en particulier, servir aux recherches sur les stades précoces de la pathologie humaine, explique Jérôme Braudeau, chercheur à l'Institut I2BM. Ils permettront de développer des médicaments efficaces à visée curative. » Aussi, les chercheurs du CEA ont-ils développé un nouveau modèle de rongeur très prometteur. La maladie d'Alzheimer se caractérise par l'agrégation de protéines tau dans les neurones et par l'apparition de plaques de peptides  $\beta$ -amyloïde à l'extérieur. Or, ces plaques amyloïdes ne seraient qu'une manifestation tardive de la pathologie. « Les peptides A $\beta$ 42 qui forment seraient initialement solubles, exerçant leur effet toxique sur les neurones bien avant la pose du diagnostic clinique » explique le scientifique. C'est pourquoi les chercheurs ont conçu un modèle de souris par transfert de gènes permettant de mimer l'apparition, à l'âge adulte, de ces peptides A $\beta$ 42 dans l'hippocampe. Un modèle dont la pertinence par rapport à la pathologie humaine a été démontrée. AL

**Hippocampe**  
Structure cérébrale qui sous-tend les mécanismes de mémorisation.

Lasers

## Les lasers à fibre de puissance gagnent du terrain

En collaboration avec l'entreprise Ixfiber, une équipe de l'Institut Iramis optimise des fibres dopées à l'ion Nd<sup>3+</sup> pour obtenir une émission laser efficace autour de 900 nm. Des longueurs d'onde particulièrement recherchées pour l'instrumentation médicale et la détection Lidar. Un rendement de conversion laser de 47 % délivrant jusqu'à 22 W a été obtenu. Un record ! La prochaine étape sera consacrée au doublement de fréquence de ce faisceau infrarouge pour réaliser une source laser bleue de plusieurs watts. AL



## QUEL FUTUR ÉNERGÉTIQUE POUR LES VILLES?

La transition énergétique est loin d'être écrite, comme l'illustrent les parcours distincts d'un pays à l'autre. Face à la conjoncture inédite de foisonnement des énergies renouvelables, le futur énergétique s'avère particulièrement incertain dans les villes. C'est en effet là que se concentrent déjà les leviers d'action, la coordination la plus complexe et que sont menées les expérimentations les plus variées. Dans le cadre du projet Écoquartier Nexus Énergie financé par l'ADEME, des chercheurs, dont certains du CEA, mobilisent les concepts les plus récents et croisent leur regard sur les systèmes énergétiques urbains. Ils ont ainsi élaboré quatre scénarios énergétiques à l'horizon 2040, centrés sur des acteurs pivots : l'État, les grandes entreprises, les collectivités locales et les coopératives de consommateurs. Questionnant le degré et les échelles de l'autonomie énergétique, cet ouvrage s'adresse aux citoyens et à tous ceux qui préparent l'avenir.

Scénarios de transition énergétique en ville. Sous la direction de Gilles Debizet  
Éditions La documentation française. 14 €



## 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.

## RENDEZ-VOUS À LA SEMAINE DE L'INDUSTRIE



Depuis 2011, la Semaine de l'industrie permet au grand public d'aller à la rencontre des professionnels de ce secteur d'activité. Elle a pour objectif de promouvoir et de renforcer l'attractivité de l'industrie et de ses métiers, auprès notamment des jeunes et des demandeurs d'emploi. Le programme national de l'édition de cette année, qui a lieu du 14 au 20 mars, est disponible sur le site de l'événement piloté par la Direction générale des entreprises.

<http://www.entreprises.gouv.fr/semaine-industrie>

## SITE 70 ANS : DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Voilà maintenant plus de 70 années que le CEA est au service de grands enjeux sociétaux et industriels ! Venez découvrir les axes de recherches qui irriguent l'organisme, depuis ses origines, sur un site Internet inédit spécialement dédié à cet anniversaire. Parmi eux : le nucléaire du futur, la fission et la fusion nucléaires, la défense et la sécurité, l'usine du futur, les énergies renouvelables, les sciences du vivant...

<http://portail.cea.fr/70ans/Pages/presentation.aspx>

## ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION AU SERVICE DE L'INDUSTRIE



CEA Tech est la direction « Recherche technologique » du CEA. Il a pour mission de produire et diffuser des technologies pour en faire bénéficier l'industrie, en assurant un « pont » entre le monde scientifique et le monde économique. Sur son site Internet, découvrez ses instituts, ses actualités scientifiques et son offre technologique pour relever le défi des transitions énergétique biotechnologique et numérique.

<http://www.cea-tech.fr/cea-tech>



Livre

## L'industrie, notre avenir

Réinventer les modèles industriels ; une industrie acceptable et acceptée ; du bon usage des modèles étrangers ; nouveaux défis et nouvelles règles du jeu... Voici quelques thèmes de cet ouvrage à destination des étudiants, enseignants, dirigeants publics et privés, élus... et de ceux que l'avenir économique de la France préoccupe. Objectif : comprendre les enjeux de la compétitivité de demain pour une industrie performante, plus sobre en ressources, respectueuse des Hommes et des territoires, s'inscrivant dans une économie ouverte et globalisée.

*La fabrique de l'industrie, Pierre Veltz, Nicolas Weil.*  
Éditions Eyrolles. 27€



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 : Fabrice Demarthon, Patrick Philippon, Vahé Ter Minassian et Minca News | Comité éditorial Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Hélène Buret, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi et Isabelle Dellis | Iconographie Micheline Bayard | Infographie Fabrice Mathé | Photo de couverture JT60SA-CEA | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation www.grouperougevf.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.

6<sup>e</sup> édition  
Semaine  
de l'industrie

# Découvrez l'industrie et ses métiers

du 14 au 20 mars 2016

Rencontres avec des professionnels,  
Visites d'entreprises,  
Conférences,  
Expositions

6<sup>e</sup> édition de la  
Semaine de l'industrie,  
dont le CEA est partenaire.  
Au programme : journées  
portes ouvertes en entreprise,  
forums des métiers, ateliers  
pédagogiques sur sites  
scolaires, jeux concours  
sur l'industrie, conférences,  
débats... Le focus 2016 :  
L'Industrie du Futur.



MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE  
avec  
MINISTÈRE DU TRAVAIL, DE L'EMPLOI,  
DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE  
ET DU DIALOGUE SOCIAL  
MINISTÈRE DE LA CULTURE  
ET DE LA COMMUNICATION

 <https://fr-fr.facebook.com/semaine.industrie>

 #SemaineIndustrie

[semaine-industrie.gouv.fr](http://semaine-industrie.gouv.fr)