# CELEGIAS Le magazine de la recherche et de ses applications

200

TOUT S'EXPLIQUE

Supplément détachable sur Le contrôle non destructif par ultrasons

#### 02

#### **L'INTERVIEW**

◆ Valérie Masson Delmotte, paléoclimatologue, revient sur la conférence scientifique mondiale sur le réchauffement climatique ◆

#### 04

#### **ACTUALITÉ**

 ◆ Pour la performance et la sécurité des logiciels critiques ◆
 La compétitivité française au service de la transition énergétique ◆ I-LAB 2015 : le CEA confirme son potentiel d'innovations ◆ Un nouvel institut pour les sciences de la mécanique et leurs applications ◆ En route vers l'exaflop ◆

#### 07

#### **SUR LE VIF**

◆ Tara lève le voile sur le bestiaire planctonique ◆ Vaincre la leucémie grâce aux recherches sur le VIH ◆

#### 09

#### LE POINT SUR

Le multirecyclage du plutonium ◆

#### 20

#### SCIENCES EN BREF

 Éviter la surchauffe des serveurs → Les faux amis
 Titane et Zirconium → Une balance à particules du CEA pour le MIT
 LINC, l'esperanto du bâtiment intelligent → Une autoroute cosmique pour les galaxies →
 Méditerranée: des eaux de plus en plus acides → Booster la sensibilité des gamma-caméras → Les premiers tubes aux spécifications d'Astrid →

> 23 KIOSQUE



www.cea.fr

#### 02 L'INTERVIEW



#### VALÉRIE MASSON DELMOTTE,

paléoclimatologue du CEA au LSCE et co-auteur du 5e rapport du GIEC

Nous ne pouvons plus séparer la question du climat des autres enjeux

Du 7 au 10 juillet dernier, la conférence scientifique *Our Common Future Under Climate Change* a réuni à Paris des chercheurs du monde entier. Valérie Masson Delmotte, paléoclimatologue explique en quoi le changement climatique nécessite une approche intégrée.

Propos recueillis par Aude Ganier

#### Vous êtes membre du comité scientifique de la conférence qui s'est tenue à Paris en juillet dernier. Quels en furent les enjeux?

Cette conférence était l'occasion de faire entendre la voix de la communauté scientifique, en amont de la XXI<sup>e</sup> Conférence des parties de la convention-cadre de l'ONU sur les changements climatiques (COP21) que présidera la France en décembre prochain.

De mémoire, c'est la plus vaste conférence abordant l'ensemble des dimensions du changement climatique. Sont ainsi intervenus plus de 2 000 chercheurs représentant 100 pays, de disciplines

(climatologie, agronomie, biologie, économie, sciences politiques, humaines et sociales), sur 165 sessions<sup>1</sup>. Ses objectifs étaient multiples: livrer une vision d'ensemble des enjeux du changement climatique; donner des bases scientifiques pour les dimensions physiques, économiques et sociales de la maîtrise du changement climatique et de ses impacts; explorer l'ensemble des solutions pour l'adaptation et la transition postcarbone, en amont des négociations à venir. Car nous ne pouvons plus séparer la question du climat des autres enjeux sociétaux. Elle s'inscrit dans une problématique beaucoup plus large, celle du triptyque écologie-économiesocial du développement durable de nos sociétés. Concrètement, le changement climatique se manifestera, entre autres, par l'augmentation du nombre et de la fréquence des événements extrêmes (vagues de chaleur, inondations, submersions côtières, etc.). Les conséquences sur les milieux naturels, les rendements agricoles, la qualité de l'air et de l'eau ont, et auront, un impact croissant sur les infrastructures, les

et compétences très diverses

systèmes socio-économiques et la santé publique. Et elles renforceront la vulnérabilité des plus pauvres, faute d'infrastructures adéquates pour s'adapter aux changements. Les risques d'impacts majeurs, persistants ou irréversibles, sont beaucoup plus importants si les émissions de gaz à effet de serre continuent à augmenter.

Justement, les engagements concrets de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) seront négociés lors de la COP 21. L'objectif étant de ne pas dépasser une augmentation de 2 °C de la température moyenne globale. Ce seuil est-il suffisant et, surtout, atteignable?

Ce seuil des 2 °C est le seul objectif concret inscrit, à ce jour, dans les traités internationaux. Il a été fixé dans le milieu des années 1990 par un Conseil des ministres européens dans la recherche d'un compromis entre l'état des connaissances sur les conséquences potentiellement dangereuses de différentes amplitudes de réchauffement, et les scénarios permettant d'atteindre cet objectif. Mais, la hausse de la température globale

Web: 1. http://www. commonfutureparis2015.org/ http://urlz.fr/2fEg moyenne de 0,85 °C a déjà des impacts négatifs aujourd'hui.

Pour que soit respecté cet objectif « 2 °C », il ne faudrait pas rejeter en tout plus de 3 200 giga tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Or, le bilan des émissions anthropiques est aujourd'hui de 2 100 Gt, dont la moitié émise ces 40 dernières années...

Une transition ambitieuse mondiale est faisable économiquement. Elle sera d'autant plus efficace qu'elle sera déployée rapidement. Pour cela, il faut que les pays développés baissent immédiatement leurs émissions de GES et que les pays émergents le fassent au plus vite. Un développement soutenable implique, face au changement climatique, une réponse intégrée d'adaptation et d'atténuation. Cela nécessite des investissements dans la R&D, le transfert de technologies, l'arrêt des subventions aux énergies fossiles et la mise en place du prix du carbone. Mais il est plus facile de baisser les rejets de GES de certains secteurs que d'autres : réduire la déforestation, investir dans l'efficacité énergétique des bâtiments et des voitures sont des actions plus simples à mettre en œuvre que pour le transport par avion ou pour l'agriculture.

Quels sont les défis à venir de la climatologie, particulièrement au LSCE?

Les défis sont nombreux à la mesure de la complexité de la machine climatique. Par exemple. pour l'étude des carottes de glace, nous préparons le projet « Beyond Epica » de forage des glaces les plus anciennes de l'Antarctique pour comprendre les modifications climatiques majeures d'il y a 1 à 1,5 million d'années. Un autre grand « chantier » est le développement d'une nouvelle génération de modèles climatiques par l'Institut Pierre Simon Laplace pour simuler plus finement les mécanismes du climat et ses réponses à différents forçages.

L'une des forces du LSCE est de décrypter le climat du passé, du présent et du futur, avec une double approche de modélisations et d'observations. Et il bénéficie d'un environnement très fécond au sein de la nouvelle Université Paris-Saclay, en interaction avec d'autres domaines scientifiques: économie, agronomie, biodiversité, sciences humaines et sociales. Cette approche intégrée du changement climatique est indispensable. Elle est visible dans la construction de la nouvelle offre de formation en masters<sup>2</sup> pour permettre aux étudiants de maîtriser les enjeux interdisciplinaires du changement climatique et ainsi se former à de nouveaux métiers. •

epuis 1991, Les Défis du CEA présente les recherches et les résultats du CEA. L'occasion d'être le témoin de grandes avancées scientifiques, tant au niveau de la recherche fondamentale que des innovations technologiques.

Pour son 200° numéro, le magazine propose une nouvelle formule. Les sujets traités, plus nombreux et approfondis, s'adressent à tous pour suivre la mobilisation du CEA face aux grands enjeux sociétaux que sont les transitions énergétique, numérique et médicale ainsi que la sécurité globale et la réindustrialisation de la France.

Alors que le CEA célébrera ses 70 ans en octobre prochain, cette rentrée est riche de grands résultats scientifiques, faisant notamment écho à des questions sociétales cruciales: promulgation de la loi sur la transition énergétique; organisation, par la France, de la XXIº conférence des parties de la convention-cadre de l'ONU sur les changements climatiques (COP21), du 30 novembre au 11 décembre 2015.

Autant de défis décryptés dans ces pages et dans celles à venir. Bonne lecture!

2. http://urlz. fr/2fEi



Rédactrice en chef



3200<sub>Gt</sub>

QUANTITÉ DE CO2 REJETÉE DANS L'ATMOSPHÈRE À NE PAS DÉPASSER POUR LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL MOYEN À 2 °C, ALORS QUE LES ÉMISSIONS ANTHROPIQUES CUMULÉES SONT AUJOURD'HUI DE 2 100 GT.

#### 04 ACTUALITÉ



#### Laboratoire commun

#### Pour la performance et la sécurité des **logiciels critiques**

Le CEA et le groupe Thales mutualisent leur savoirfaire et leur expertise pour mettre en place de nouvelles méthodes formelles de validation des logiciels et systèmes critiques. Grâce à la création d'un laboratoire commun, Thales pourra notamment améliorer la performance de son ingénierie en aéronautique, défense, sécurité et transport.

Dans n'importe quel secteur industriel, l'étape de validation représente une part significative du coût de développement des logiciels, d'autant plus si elle fait appel à des démarches manuelles d'analyse, de test ou d'audit. Ainsi, grâce aux outils mathématiques des méthodes « formelles », développées depuis de nombreuses années au CEA-List, le processus est partiellement automatisé. Par ailleurs, l'approche de validation peut être modifiée en remplaçant, par exemple, des campagnes de tests exhaustives par des méthodes analytiques.

#### Visite présidentielle

#### La compétitivité française au service de la transition énergétique

« Nous devons être en mesure de proposer des offres à des pays qui seront demandeurs, à des coûts qu'ils peuvent supporter » a déclaré le Président de la République, lors de sa visite, le 20 août 2015, de l'Institut national de l'énergie solaire (INES). Accompagné de la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, il a échangé avec les chercheurs et partenaires industriels du CEA autour de plusieurs

800

PUISSANCE TOTALE D'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE AUTORISÉE POUR L'APPEL D'OFFRES « CRE3 » démonstrateurs technologiques destinés aux marchés mondiaux de l'énergie : solaire photovoltaïque, couplage des énergies renouvelables aux réseaux intelligents, énergétique des bâtiments. Lors d'une table ronde sur l'innovation au service de la transition énergétique, animée par le Directeur de CEA Tech, le chef de l'État a rappelé que la France devait être exemplaire, en prévision de la Conférence sur le climat à paris (COP21). Il a ainsi annoncé le doublement de la puissance autorisée pour l'appel d'offres solaire photovoltaïque « CRE3 » de la Commission de régulation de l'énergie : « afin qu'il y ait beaucoup plus de capacités de développement en France, pour aller ensuite chercher des marchés extérieurs ».



#### **DÉPÊCHES**

#### **3 JUILLET**

La plateforme régionale de transfert technologique (PRTT) de CEA Tech est inaugurée au technopole de Metz

en présence du Premier Ministre Manuel Valls, en déplacement en Moselle pour la signature du contrat de plan État-Région. Avec Nantes, Bordeaux, Toulouse et Cadarache, CEA Tech a implanté cinq PRTT, qui travaillent en étroite relation avec les acteurs locaux des différentes régions.

#### 9 JIIII I F1

CEA Tech, Hydro-Québec et sa filiale SCE France annoncent la signature de deux accords de R&D dans le domaine des transports électriques terrestres. Le premier concerne la recharge rapide des autobus électriques, élément clé dans l'émergence de cette filière. Le second porte sur le développement d'une nouvelle génération de matériaux de batteries lithium-ion, plus performante et pouvant être produite à faible coût.

#### 27 JIIII I FT

Le CEA, l'Agence marocaine de l'énergie solaire (MASEN) et le groupe Alcen vont coopérer dans le domaine de l'énergie solaire en vue de développer l'innovation et l'industrie de ce secteur au Maroc. Dans une dynamique commune de transition énergétique, les signataires valorisent ainsi la complémentarité de leurs expériences et savoir-faire.

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

## I-Lab 2015: le CEA confirme son potentiel d'innovations et de transferts technologiques







À l'occasion de l'édition 2015 de I-Lab du ministère de la Recherche, le CEA démontre à nouveau le dynamisme de ses scientifiques dans l'innovation, le transfert technologique et l'entreprenariat. Dix projets de sociétés portés par ses chercheurs, ou avec leur soutien, sont en effet primés par ce concours national d'aide à la création d'entreprises innovantes.

Sept entreprises se distinguent dans la catégorie « création-développement » qui subventionne jusqu'à 450 000 € les lauréats; et les trois porteurs de projets récompensés par la catégorie « émergence », se voient dotés d'une enveloppe pouvant atteindre 45 000 € pour financer les études préalables à la création de leur entreprise.

10

NOMBRE DE LAURÉATS D'I-LAB 2015 IMPLIQUANT LE CEA

#### Catégorie « création – développement »:

AERACCESS: conception d'un drone à voilure fixe longue endurance avec une motorisation hybride en bénéficiant d'une technologie du CEA-Liten.

AJELIS: développement de

matériaux d'extraction sélective de métaux contenus dans les effluents liquides industriels, à partir d'une innovation issue du CEA-Iramis et l'institut ICMMO.

eLichens: commercialisation
de nouveaux capteurs, issus
d'une technologie du CEA-Leti, et de
services pour la mesure de la qualité
de l'air afin de cibler des marchés
de l'électronique grand public.
E-SIMS: gestion des stockages
d'électricité dans les systèmes
intelligents en s'appuyant sur des
algorithmes, logiciels et savoir-faire

**MedPrint:** innovation dans l'exploration des maladies neurologiques à partir des travaux

du CEA-Liten.

d'une collaboration CEA/Inserm/ UJF/CHU.

mirSense: conception, fabrication et distribution de composants à base de laser pour l'analyse de gaz, grâce à une technologie issue notamment du CEA-Leti.

**SYBOT:** développement de robots collaboratifs pour l'industrie en s'appuyant sur une technologie du CEA-List (*voir le dossier de ce numéro*).

#### Catégorie « émergence »:

Cam3DS: développement d'une solution de capture 3D multispectrale à partir de travaux du CEA-List et CEA-DAM.

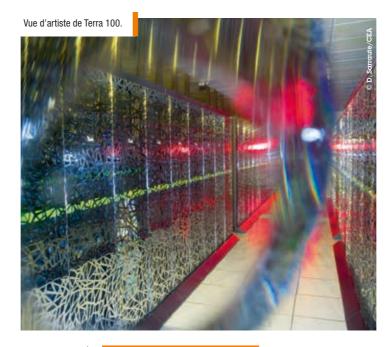
**KNIMA:** élaboration de solutions innovantes de fouille de données multimédia en se basant sur une innovation du CEA-List.

**EnWireS:** commercialisation de matériaux performants pour le stockage de l'énergie dans les batteries lithium-ion, en s'appuyant sur une technologie du CEA-Inac.

#### Inauguration

#### Un nouvel institut pour les sciences de la mécanique et leurs applications

L'IMSIA, ou Institut des sciences de la mécanique et applications industrielles, est inauguré sur le plateau de Saclay. Créé par le CEA, le CNRS, l'ENSTA et EDF, il a pour objectif de répondre aux enjeux industriels et sociétaux autour de la mécanique et de la durabilité des structures et des systèmes complexes. Il permettra notamment de lever un certain nombre de verrous scientifiques associés aux applications industrielles dans les domaines de l'énergie, du transport et de la défense. Pour y parvenir, la feuille de route scientifique de l'IMSIA est structurée en trois axes: couplage multi-physique et durabilité des matériaux et structures; acoustique, et dynamique des structures et fluides; méthodes inverses, identification, méthodes numériques et plateformes numériques de capitalisation. Les méthodes et outils développés auront ensuite vocation à être transférés dans les processus d'ingénierie et dans la réglementation. En rassemblant une centaine de personnes, l'IMSIA constitue déjà un modèle de collaboration entre académiques, industriels et centres de recherche.



#### Recherche collaborative

#### En route vers l'exaslop

Le CEA vient de signer avec Atos, leader européen dans la conception de supercalculateurs, un contrat pour acquérir Tera1000. Cette machine de technologie Bull préfigurera un supercalculateur de classe **exaflopique** qui sera mis en œuvre à l'horizon 2020, pour les besoins des programmes du CEA-DAM. Pour y parvenir, des ruptures technologiques seront nécessaires, notamment pour maîtriser la consommation électrique d'une telle machine. C'est pourquoi le CEA a décidé d'appliquer une méthodologie anticipée de co-design du futur calculateur avec ce partenaire industriel.

Une première machine sera livrée cette année, avec une capacité de calcul similaire au calculateur **pétaflopique** Tera100 du CEA-DAM mais avec une consommation électrique cinq fois plus faible. Le contrat prévoit ensuite la livraison d'une deuxième machine, avec une mise en service en 2017, dont l'architecture préfigurera celle d'EXA1. Elle devrait atteindre une puissance de calcul de 25 pétaflops et une performance énergétique vingt fois meilleure que celle de Tera 100.

25

PUISSANCE DE CALCUL DU FUTUR TERA 1000.



Milliard de milliard d'opérations par seconde (10<sup>18</sup>).

Exaflop

#### Pétaflop

Million de milliards d'opérations par seconde (10<sup>15</sup>).



#### 14 AU 18 SEPTEMBRE 2015 CONFÉRENCE GÉNÉRALE DE L'AIEA (VIENNE)

59° édition de la séance plénière de rentrée réunissant tous les états membres. En marge, le stand de « l'équipe de France du nucléaire » livre sa vision d'un nucléaire responsable.

#### 15 AU 17 SEPTEMBRE 2015 ÉVÉNEMENT SMART INDUSTRIES (PARIS)

Rencontres « business » sur le thème de l'usine connectée intelligente. Exposition, conférences (avec la participation de Karina Gosse, Directrice du CEA-List) et travaux pratiques, ouverts aux étudiants, couvrent toute la chaîne de valeur : conception produit/ process; pilotage et contrôle de l'appareil de production; opérations de fabrication; services liés à l'appareil de production; technologies numériques; organisation du travail.

#### 21 AU 24 SEPTEMBRE 2015 CONFÉRENCES GLOBAL 2015 (PARIS)

21° édition des conférences organisées par la Société française d'énergie nucléaire (SFEN) sur la thématique « Le combustible nucléaire pour un futur durable ». Parmi les Intervenants: Daniel Verwaerde (Administrateur général du CEA), Yves Bréchet (Hautcommissaire à l'énergie atomique), Mikhail Chudakov (Directeur général adjoint de l'AIEA) ainsi que leurs homologues académiques et industriels européens, américains, asiatiques.

#### **22 AU 24 SEPTEMBRE 2015**

#### SALON ENOVA PARIS (PARIS)

Nouvelle édition du salon des technologies et des services, placé sous les thèmes de l'lot (*internet* of things), des systèmes embarqués, du M2M (*machine to machine*), des *smart cities* (villes intelligentes) et de l'e-santé. Présence du CEA sur la thématique de l'optonique et de la photonique.



Biodiversité

## Tara lève le voile sur le **bestiaire planctonique**

La revue *Science* consacre un numéro spécial aux résultats de l'expédition Tara. Pendant quatre ans, la goélette a sillonné les océans, prélevant plus de 35 000 échantillons. Elle ouvre ainsi la porte sur un monde à la richesse insoupçonnée. *par Amélie Lorec* 



uels organismes forment le plancton marin? Comment sont-ils répartis dans les océans? Sont-ils affectés par le changement climatique? Répondre à ces interrogations est la raison d'être de l'expédition Tara Océans, collaboration internationale comprenant le CEA-IG qui livre ses tout premiers résultats. Non sans surprise... Car les données, issues de ce plus grand séquençage jamais effectué sur des organismes marins, révèlent une population planctonique bien plus foisonnante que prévue.

#### Un séquençage massif et des milliers de données à analyser

En effet, près de 40 millions de gènes microbiens (virus, procaryotes et pico-eucaryotes marins) ont été décryptés, dont 80 % sont inédits. Et plus de 100 000 types de protistes ont été identifiés, tels que parasites, symbiontes et prédateurs en tout genre ; contre les 11 000 espèces seulement connues jusqu'à présent. Le tout constitue la base de données la plus complète d'un écosystème! C'est grâce au séquençage massif d'une partie des 35 000 échantillons collectés par la goélette dans les océans de la planète de 2009 à 2013 que cette diversité planctonique insoupçonnée a été dévoilée. Coordinateur scientifique du projet sur les aspects génomiques, le Genoscope du CEA-IG a notamment analysé plus de 600 échantillons. « Pour séquencer un tel volume nous avons utilisé la méthode de <mark>métagénomique</mark> qui consiste à étudier le contenu génétique global de communautés entières de micro-organismes contenu dans un échantillon. Les données engendrées, mille fois plus nombreuses que celles obtenues dans les études précédentes, ont ensuite été analysées à l'aide de gros moyens de calcul bio-informatique<sup>1</sup> permettant de les comparer à des bases de données connues d'ADN d'espèces proches » explique Patrick Wincker, directeur du Genoscope.

Autres résultats publiés: les interactions entre organismes apparaissent majoritairement de type symbiotique et les paramètres physico-chimiques des océans influent sur la répartition du plancton. Un ensemble d'informations qui permettra la calibration des modèles prédictifs nécessaires à l'étude de l'impact du changement climatique.

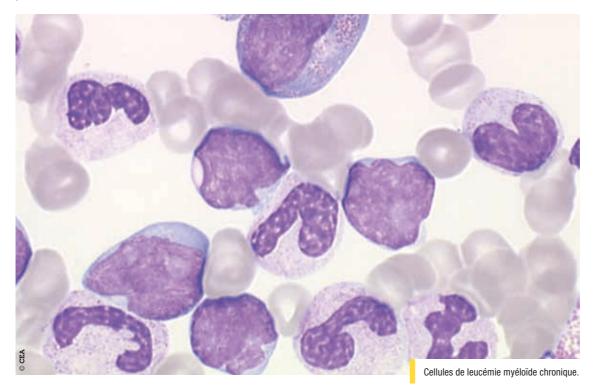
1. Obtenus dans le cadre du projet France génomique.



#### Thérapies innovantes

## Vaincre la leucémie, grâce aux recherches sur le VIH

Publiés dans la revue scientifique *Nature*<sup>1</sup>, les travaux d'une équipe du CEA-IMETI nourrissent d'importants espoirs dans le traitement de la leucémie myéloïde chronique.



Note : 1. Le 2 sept. 2015 (doi:10.1038/ nature15248)

#### Cellules souches leucémiques

Cellules souches hématopoïétiques cancéreuses

#### Cellules souches hématopoïétiques

Cellules qui sont à l'origine de l'ensemble des cellules sanguines : globules blancs, globules rouges, plaquettes.

#### Patients en maladie résiduelle

Patients dont la majeure partie de la masse tumorale a pu être éliminée par le traitement, mais dont la partie constituée par les CSH cancéreuses à l'origine de la maladie persiste.

rande première pour la leucémie myéloïde chronique (LMC): cette pathologie, qui représente 15 à 20 % des cancers du sang de l'adulte, pourrait bénéficier d'une nouvelle thérapie. Aujourd'hui, le traitement utilise la molécule « imatinib ». Performante pour éliminer la masse tumorale, elle n'a que peu d'effet sur les cellules souches leucémiques (CSL). « Or ces dernières sont à l'origine de la maladie et des rechutes. Aussi, la LMC oblige-t-elle le patient à suivre son traitement à vie » indique le Pr. Philippe Leboulch, directeur du CEA-IMETI, dont le laboratoire a découvert de manière inédite comment cibler spécifiquement les CSL

#### Une étude sur le VIH pour comprendre la LMC

Sous l'impulsion de Stéphane Prost du CEA-IMETI, les chercheurs se sont inspirés de leur étude sur le VIH publiée en 2008. Elle visait à comprendre les cytopénies sanguines fréquemment observées chez les personnes séropositives, c'est-à-dire la diminution de l'effectif de différents types de cellules sanquines. Ils s'étaient alors intéressés à l'étude des cellules souches hématopoïétiques (CSH) chez un modèle primate non-humain séropositif. « Nous avons alors découvert l'action d'une protéine virale responsable d'une altération de la capacité des CSH à générer de nouvelles cellules

sanguines. Relâchée dans le plasma, elle se fixe sur un de leurs récepteurs, le PPARy, et l'active » précise Stéphane Prost. Ce phénomène induit la diminution d'autres protéines, les STAT5, impliquées dans le maintien et la différenciation des CSH. Conséquence: moins de différenciation, donc moins de cellules sanguines. Dans le cas de la LMC, c'est tout le contraire qui se produit! Les STAT5 sont constitutivement activées et ce mécanisme favorise la persistance de CSL et leur résistance au traitement.

#### Du laboratoire directement aux essais cliniques

« Forts de ces connaissances, notre stratégie de thérapie contre la LMC a été de cibler PPARy pour diminuer la quantité des STAT5, et épuiser le réservoir de CSL, explique le chercheur. Nous savions qu'une molécule, la pioglitazone, agissant spécifiquement sur PPARy bénéficiait d'une autorisation de mise sur le marché dans le cadre du traitement du diabète de type 2. » Une aubaine pour les scientifiques qui ont pu tester la thérapie directement sur l'Homme, sans passer par la phase de tests précliniques.

Sur la base des résultats biologiques, un essai clinique de phase 2 a été lancé avec le Pr. Philippe Rousselot de l'hôpital Mignot de Versailles. 24 patients en maladie résiduelle de la LMC ont ainsi pris un traitement combiné (imatinib + pioglitazone) pendant un an. À l'issue de l'essai, 57 % des patients sont en rémission complète avec le traitement combiné, contre seulement 27 % pour le groupe traité par imatinib seul. De plus, les 3 premiers patients traités, pour lesquels le recul est important, demeurent tous sans LMC résiduelle détectable près de 5 ans après l'arrêt de la pioglitazone. Une efficacité avérée qui représente un solide espoir de guérison définitive pour les malades. Actuellement, cette stratégie est évaluée par l'équipe de scientifiques sur d'autres pathologies cancéreuses récidivantes. •



## Le multirecyclage du Plutonium

epuis plus de trente ans, le plutonium contenu dans le combustible usé issu des réacteurs français est récupéré dans les usines d'Areva de La Hague, en vue d'être ré-exploité sous forme de combustible « MOX ». Constitué d'environ 8,5 % de plutonium complété par de l'uranium appauvri, ce « Mélange d'OXydes », imaginé dans les années 1980, est aujourd'hui fabriqué à l'usine Melox d'Areva. Enjeux : économiser les ressources naturelles et minimiser les déchets ultimes.

#### Optimiser le cycle fermé du combustible

Derrière cette stratégie globale, de la France, de traitement-recyclage appelé « cycle fermé du combustible », se trouve un ensemble de procédés développés avec le CEA et mis en œuvre industriellement dans les usines d'Areva. Ces opérations ont aujourd'hui atteint

une pleine maturité, résultat de décennies de R&D pour atteindre des taux de récupération des matières plutonium et uranium très élevés (supérieurs à 99 %). Environ 30000 tonnes de combustibles usés ont été traitées et près de 2000 tonnes de MOX ont été fabriquées. Ceci a d'ores et déjà permis de réduire d'autant les entreposages de combustibles usés et d'économiser plus de 25000 tonnes d'uranium naturel. Peut-on aller plus loin, en exploitant le plutonium restant dans ce « MOX usé », en vue de confectionner du « MOX recyclé » ? Cette question de la faisabilité du multirecyclage du plutonium a été posée au CEA, dans le cadre de la loi du 28 juin 2006 relative à la « Gestion durable des matières et déchets radioactifs ». Le 30 juin dernier, les experts de la Direction de l'énergie nucléaire (CEA-DEN) ont rendu compte de leurs recherches, sous la forme d'un rapport de prospective remis aux parlementaires. ◆◆◆



#### Des neutrons rapides pour multirecycler le plutonium

« Le multirecyclage du plutonium est une option pour l'avenir car les réacteurs actuels ne permettent pas à ce jour, d'envisager de procéder à cette opération de façon efficace » rappelle Bernard Boullis, directeur du Programme aval du cycle nucléaire du CEA-DEN à Saclay. Certes.

#### Rappels neutroniques

Dans un réacteur à eau pressurisée (REP), les neutrons issus de la fission d'un noyau fissile sont ralentis par un modérateur (élément léger comme l'hydrogène présent dans l'eau). De « rapides », avec une énergie de 2 MeV (soit 20000 km/s), ils deviennent « thermiques », à 0,025 eV (soit 2,2 km/s). Cela permet d'accroître leur probabilité d'interaction avec d'autres noyaux fissiles, en particulier l'uranium 235 du combustible, pour optimiser les réactions en chaîne de fission nucléaire.

Cette option de modération présente toutefois un inconvénient pour le plutonium 239 (élément formé à partir de l'uranium 238 du combustible). Dans ces conditions, il n'est qu'en partie fissionné, les réactions engendrant aussi, inéluctablement, la formation d'isotopes supérieurs, dont certains (les isotopes pairs) sont non fissiles sous flux de neutrons « thermiques ». Ce qui constitue une limitation physique intrinsèque des réacteurs à eau.

En revanche, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) n'ont pas de modérateur et présente ainsi une bien meilleure capacité physique à fissionner l'ensemble des isotopes du plutonium. Lesquels peuvent être réutilisés de façon récurrente comme matière fissile dans les recharges de combustible. après usage, le « MOX » compte toujours des quantités appréciables de cet élément. Les dix tonnes de plutonium récupérées chaque année dans les usines de La Hague permettent de fabriquer 120 tonnes de combustible MOX, chargé dans les 22 réacteurs français aptes à le consommer. Et, une fois passés en réacteur, ces combustibles contiennent encore sept tonnes de plutonium. Mais, ce dernier possède alors une composition isotopique inadaptée à une exploitation efficace par la technologie actuelle des REP. En revanche, les réacteurs de quatrième génération à « neutrons rapides » (RNR), comme « Astrid », le projet de démonstrateur technologique à l'étude au CEA, seraient à même de tirer parti de l'ensemble de ce plutonium pour produire de l'électricité (voir encadré). « Cela nous amène à concevoir des systèmes où le recyclage du plutonium serait généralisé, de façon récurrente, pour exploiter tout le potentiel de la ressource initiale en uranium » explique Bernard Boullis.

#### Des procédés de récupération éprouvés, à adapter

La mission confiée par le législateur au CEA était de démontrer la faisabilité d'une telle opération dans les conditions de divers scénarios technico-économiques de développement du nucléaire. Car le problème n'est pas seulement technique.

Sur ce plan, la solution existe déjà : certains procédés, utilisés en routine dans les ateliers d'Areva de La Hague, pourraient être adaptés pour réaliser l'opération consistant à extraire le plutonium du MOX usé. Il s'agit de dissoudre dans des bains d'acide, des tronçons de crayons de combustible sortis des réacteurs. Puis de mettre en contact la solution ainsi obtenue, avec un fluide non miscible contenant du « tributylphosphate », une molécule à même de capter le plutonium et l'uranium. Avant, enfin, de séparer ces deux éléments chimiques et de les solidifier. Trois campagnes

industrielles conduites à La Hague entre 2000 et 2010, portant sur 70 tonnes de combustibles, ont démontré que la méthode fonctionne pour le MOX usé des REP. « Le principal enjeu provient de la part plus importante de plutonium qui sera à traiter » prévient Christophe Poinssot, chef du département Radio-chimie et Procédés du CEADEN à Marcoule.

« Concernant le MOX usé des RNR, le principe de base restera le même », assure le scientifique. Il n'empêche. Les assemblages de combustible des RNR n'ont ni la même géométrie, ni les mêmes gaines (elles seront en acier et non en zirconium) que les assemblages actuels. Cela impliquera également de revoir la « tête » de l'usine dédiée au cisaillement des assemblages. « Nous avons démontré que nous savons techniquement le faire puisque nous avons déjà retraité près de 25 tonnes de combustible usé du RNR (de deuxième génération) Phénix, à Marcoule et à La Hague. Là encore, l'enjeu est d'adapter ces procédés » rappelle Christophe Poinssot.

#### Vers la faisabilité économique du multirecyclage...

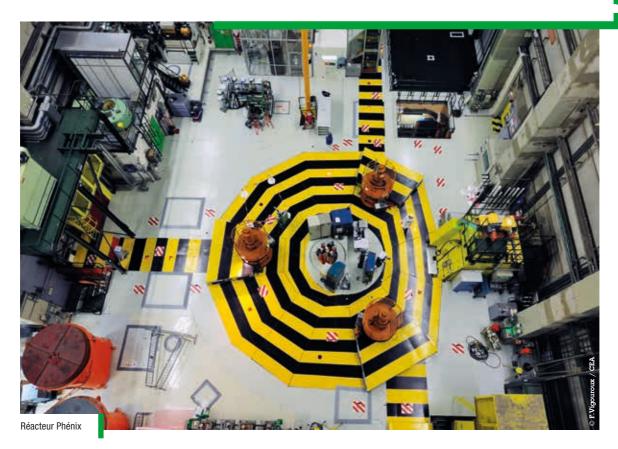
D'où la nécessité de développer des méthodes industrielles d'extraction du plutonium contenu dans le MOX usé, adaptées au traitement de gros volumes de matières. C'est ce que tentent de faire les chercheurs du CEA à Marcoule. En ce qui concerne la première étape, dédiée à la dissolution du combustible, ces scientifiques portent leurs efforts sur des techniques visant à éviter la formation, dans les bains d'acide, de résidus solides. Leur but?

Optimiser le taux de récupération de cet élément qui devrait atteindre les 99,9 %. Le « procédé de digestion » finalement retenu consiste à rajouter dans le fluide certaines espèces chimiques agissant à la manière de catalyseurs. Il a été trouvé suffisamment attractif par Areva pour que ce dernier décide de le retenir pour le projet d'atelier « TCP » (traitement des combustibles particuliers) de La Hague, lequel devrait voir le jour bien avant la mise en service du premier RNR de quatrième génération.

Pour la phase de « séparation », les équipes de Marcoule travaillent à de nouvelles molécules « extractantes » à même de remplacer le « tributylphosphate ». « En effet, la récupération du plutonium et de l'uranium dissous, à l'aide de ce dernier composé, mobilise actuellement à La Hague trois ateliers successifs » rappelle Christophe Poinssot. À Marcoule, les scientifiques cherchent ainsi à substituer à ce composé un autre, plus efficace, à même de « capter » les éléments chimiques par une seule mise en contact et donc dans une seule et même installation. Un « monoamide » a d'ores et déjà été identifié. Testé fin 2014 sur la chaîne « Atalante » de Marcoule, sur cinq kilos de combustible usé, il s'avère très prometteur. ◆

Nous avons déjà retraité près de 25 tonnes de combustible usé de RNR. Là encore, l'enjeu est d'adapter ces procédés.

Christophe Poinssot



Usine du futur

## Le numérique booste le poste de travail

Garante de la compétitivité des entreprises sur les marchés mondiaux, l'industrie du futur se prépare aujourd'hui. Elle est au cœur de plusieurs initiatives gouvernementales, dont la Nouvelle France Industrielle et fait l'objet de nombreuses recherches.

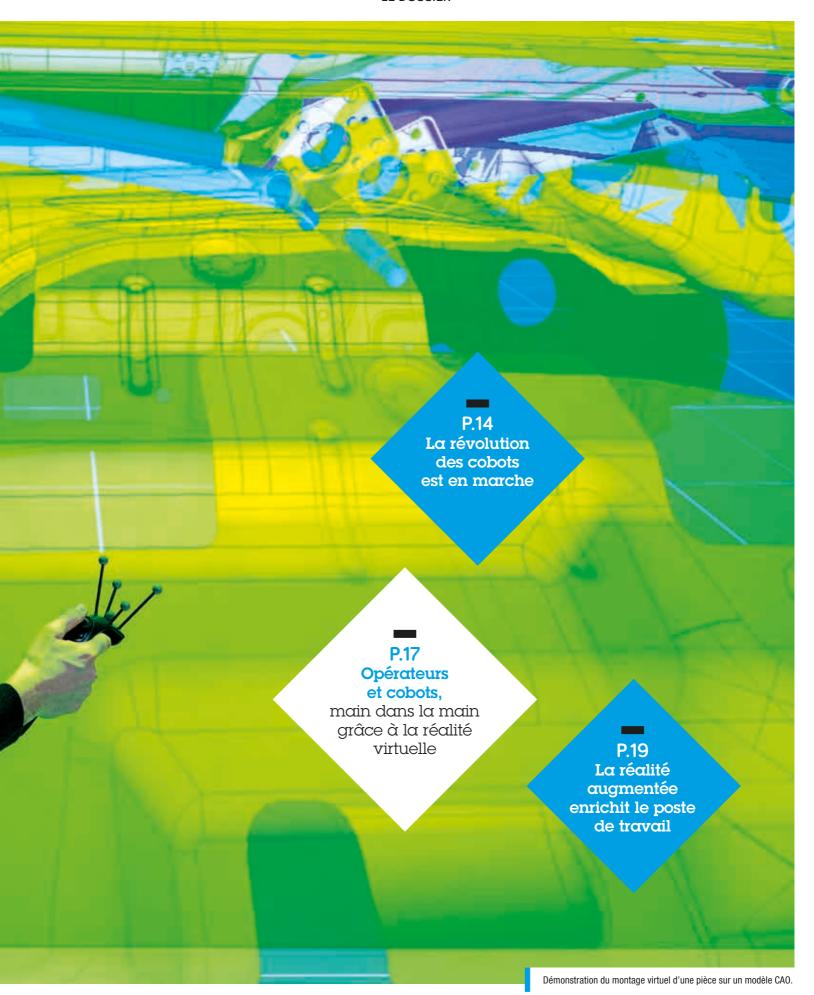
Fort de son expertise en robotique interactive, réalité virtuelle ou augmentée, CEA Tech se positionne sur ce secteur émergent pour accompagner les industriels dans l'innovation et l'optimisation de l'ergonomie des postes de travail. Enjeu : réduire la pénibilité au travail et valoriser l'opérateur, désormais positionné sur des tâches à forte valeur ajoutée.

Dans cette mission, il peut compter sur de nouveaux alliés: les cobots, ou robots collaboratifs.

par Matthieu Grousson



13 LE DOSSIER



Usine du futur : le numérique booste le poste de travail

# La révolution des **cobots** est en marche

Conçus pour interagir directement avec l'opérateur et l'assister dans les tâches les plus pénibles, les robots collaboratifs investissent les chaînes de montage industrielles. Fer de lance de cette révolution, le CEA-List propose une famille complète de ces cobots, développés pour et avec des partenaires industriels des secteurs automobile, aéronautique, BTP, santé...

our l'œil profane, ce n'est sans doute qu'un bras robot, ni plus grand, ni plus impressionnant qu'un autre. En réalité, le nouveau prototype de robot collaboratif de la start-up Sybot (pour « SYmbiose homme roBOT »), a été conçu spécifiquement pour l'interaction avec les opérateurs humains. Grâce à une innovation technologique de rupture développée au CEAList, ce cobot, pour « COllaborative roBOT », contrôle son effort sans

capteurs dédiés. Il peut donc coopérer en sécurité et de manière robuste avec les opérateurs, combinant ainsi flexibilité du poste manuel et productivité robotique. « Autrement dit, c'est un robot qui assiste l'opérateur, lequel conserve sa capacité de perception et de décision ainsi que son savoir-faire sur la chaîne de travail » indique Yvan Measson, chargé d'affaires au CEA-List et porteur de la start-up Sybot. Grâce à cette interaction, la mise en œuvre et la programmation sont simplifiées par rapport à celles d'un robot industriel classique. Cette alliance, pour ne pas dire symbiose, entre l'homme et la machine, est donc synonyme de flexibilité maximum et de gains de compétitivité.

#### Plus flexibles que leurs cousins robots

Aujourd'hui, les robots industriels, typiquement ceux de l'industrie automobile, sont certes fiables et rapides, mais travaillent seuls derrière des barrières. Conçus pour les chaînes de production en grandes séries, ils manquent de

#### Il n'est désormais plus obligatoire de séparer les humains et les robots

Gregorio Ameyugo



flexibilité. Les cobots, qui ont vocation à travailler en interaction étroite avec l'homme, répondent davantage à ce besoin, et la mise en place de nouveaux standards robotiques en 2011 autorise de nouvelles possibilités de coopération homme-machine dans l'industrie. Autrement dit, « il n'est désormais plus obligatoire de séparer les humains et les robots », résume Gregorio Ameyugo, responsable des partenariats industriels au CEA-List.

Car là est le point sensible de l'avènement des cobots: garantir l'intégrité physique de l'opérateur travaillant avec ou à proximité du robot. De ce point de vue, le CEA-List possède des atouts, développés à l'origine dans une perspective de robotique plus « traditionnelle ». En l'occurrence, ils résultent de plusieurs décennies d'innovation en robotique nucléaire, domaine dans

#### Usine du futur : le numérique booste le poste de travail

lequel l'institut du CEA a développé une expertise unique en téléopération. Son principe : des bras robotisés « esclaves » opérant dans un environnement inaccessible à l'homme et, ce faisant, pilotés par un bras « maître » placé entre les mains d'un opérateur. L'enjeu de cette technique est bien de permettre à ce dernier de ressentir, malgré la distance, des sensations proches de celles qui seraient les siennes s'il accomplissait lui-même la tâche. Or, comme l'indique Gregorio Ameyugo: « pour le dire vite, si on prend un bras esclave et un bras maître et qu'on les met ensemble, on obtient un cobot!»

#### Une technologie brevetée d'actionnement

En la matière, le facteur différenciant majeur du CEA-List repose sur la technologie d'actionnement utilisant des vérins à vis à billes et à câbles qui remplacent les engrenages pour l'actionnement des articulations d'un robot. Son avantage: la diminution drastique du frottement et de l'inertie qui permet un important gain en simplicité et en performance. « Nos premières réalisations de vérins à vis à billes et à câbles remontent à 2003 et nous avons depuis déposé une dizaine de brevets, les derniers en 2014, détaille Yann Perrot, chef du laboratoire de robotique interactive au CEA-List. C'est aujourd'hui une technologie mûre, tout en étant toujours en évolution. »

Mise en œuvre dans un cobot, elle permet en particulier de se passer complètement de capteurs, notamment pour la détection de l'interaction avec un opérateur. Précisément, la mesure de l'effort exercé par le robot s'effectue directement par l'asservissement du courant des moteurs. D'où des robots doués d'une grande finesse et particulièrement sûrs, plus robustes, car incorporant moins de composants et donc, moins chers.

La start-up Sybot porte ainsi le dernier cobot du CEA-List qui bénéficie de cette technologie. Robot d'assistance, il peut partager sa tâche avec les opérateurs, mais il peut également travailler seul et se programme par simple touché en lui montrant

la tâche à effectuer. La parfaite maîtrise de l'effort permet enfin de l'utiliser pour de nombreuses tâches de parachèvement de pièces comme le ponçage ou le polissage. De quoi envisager des partenariats dans l'aéronautique, l'agroalimentaire ou encore la construction navale. Le début de la production de ce cobot est programmé pour 2016. « Du fait de la très grande finesse de contrôle d'effort et de la grande flexibilité de ce cobot, il pourrait même investir le secteur de la santé pour lequel cette qualité s'avère essentielle », ajoute Yvan Measson.

#### Des systèmes maîtresesclaves aux exosquelettes

L'offre du CEA-List va bien au-delà, comme l'illustre l'ensemble de ses réalisations. Depuis 2006, sa start-up Haption propose par exemple des interfaces **haptiques** s'inspirant des systèmes maître-esclave du nucléaire. Ces interfaces sont aujourd'hui largement diffusées pour les applications de réalité virtuelle notamment dans les industries automobile ou aéronautique.

De son côté, la société RB3D s'est appuyée sur des innovations du CEA-List pour mettre au point en étroite collaboration avec l'Institut un exosquelette des membres inférieurs, HERCULE. Initialement développé dans le cadre d'un projet DGA, il suscite désormais un fort intérêt dans le secteur civil, notamment pour le BTP. Dans sa quatrième version, il s'agira d'une plateforme de développement sur laquelle viendront se greffer des bras ou accessoires adaptés à différents environnements industriels.

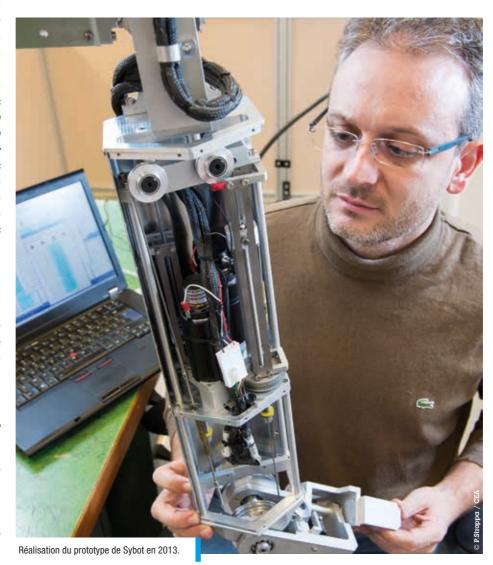


#### **POURQUOI LE CEA**

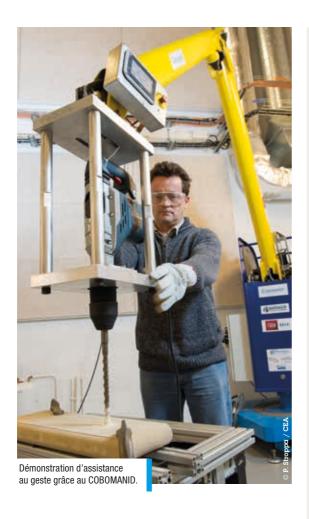
est un leader en robotique interactive

L'expertise historique du CEA-List résulte de plusieurs décennies d'innovation en robotique nucléaire et notamment en téléopération permettant des interventions en milieu hostile. Une activité qu'il poursuit par ailleurs.

Haptique Science du toucher



#### Usine du futur : le numérique booste le poste de travail



« Ce type de technologies permet à une personne de porter des pièces plus lourdes, donc plus grandes. À terme, elles peuvent avoir un impact fort jusqu'à la conception industrielle, car qui dit pièces plus grandes, dit également moins de pièces, donc moins de vis et d'écrous et ce faisant une plus grande robustesse », analyse Gregorio Ameyugo.

Également au catalogue de RB3D, le cobot A6.15 qui permet de manipuler des outils portatifs lourds ou vibrants, telles des meuleuses, sans les supporter directement, et donc de réduire l'exposition aux vibrations. L'une de ses premières applications concrètes: le brossage de pneus où il permet de réduire de 20 kg à 1 kg la force à appliquer par l'opérateur en charge de cette tâche par ailleurs impossible à automatiser.

#### L'assistance au geste

Enfin, depuis 2010, Sarrazin Technologies et le CEA-List co-développent le

## Le passage à l'ère robotique pour les PME de l'hexagone!

L'usine de demain ne se fera pas sans robot, y compris dans les petites et moyennes entreprises. Le projet Robot Start PME, coordonné par le SYMOP (Syndicat des entreprises de technologies de production), a été lancé en mars 2013 pour les aider à robotiser leurs installations. 200 entreprises ont ainsi bénéficié du réseau d'experts mis en place avec les deux autres partenaires du projet, le CEA-List et le CETIM (Centre technique des industries mécaniques).

Les projets ont été menés du diagnostic à la co-conception de la cellule robotique jusqu'à son intégration dans la chaîne de production. Après deux ans, le plafond du budget d'aide prévu a été atteint, signe du succès de l'opération.

Par ailleurs, avec CAPME'UP, les trois instituts Carnot CEA-List, CETIM et IFPEN se sont associés pour aider les entreprises à concrétiser leurs projets d'innovation. Outre le diagnostic technologique et un accompagnement à l'innovation pour passer de la conception au prototypage industriel, ils offrent un accès à leurs trois plateformes technologiques (contrôle non destructif, intégration système et robotique interactive).

Par exemple, la plateforme Robotique interactive propose aux PME et ETI des solutions concrètes pour améliorer leur productivité et leur qualité de production tout en limitant les troubles musculo-squelettiques par le développement de dispositifs d'assistance au geste.

www.robotstartpme.fr. / www.capmeup.fr

COBOMANIP pour l'assistance dans la manipulation de charges allant jusqu'à 100 kilos dans un rayon de 3,5 mètres. Il a été conçu à partir d'un manipulateur qui équilibre la charge transportée dans toutes les positions de l'espace pour recréer des conditions similaires au travail en apesanteur. Il génère également une force qui agit « virtuellement » pour aider l'opérateur tout en conservant un niveau impressionnant de sensibilité cutanée (haptique). Sur un plan industriel, le suivi d'une trajectoire virtuelle permet d'augmenter la productivité, améliorer la qualité et la sécurité des biens et personnes, et réduit le temps d'apprentissage de l'opérateur pour favoriser la polyvalence des équipes. « Ces innovations résultent de l'intégration de technologies de contrôle temps

réel du CEA qui s'opposent au déplacement de la machine lors de la détection d'éventuelles collisions avec son environnement. De même, nos solutions mécaniques permettent de travailler avec des moteurs de faibles puissances ; tout en conservant de très bonnes propriétés haptiques lors de l'exécutionde taches difficilement dévolues aux robots » indique Marc-Antoine Seris, PGD de Sarrazin Technologies qui précise que des débouchés ont déjà été trouvés chez des groupes comme Airbus et Areva. Autant d'innovations qui s'insèrent dans le plan Industrie du Futur<sup>1</sup> et positionnent le CEA-List en tant qu'acteur majeur de la cobotique pour favoriser le déploiement de l'usine du futur. Et faire de la France un pays leader en la matière. •

Notes: 1. Plan de la Nouvelle France Industrielle

Usine du futur : le numérique booste le poste de travail

## Opérateurs et cobots, main dans la main, grâce la réalité virtuelle

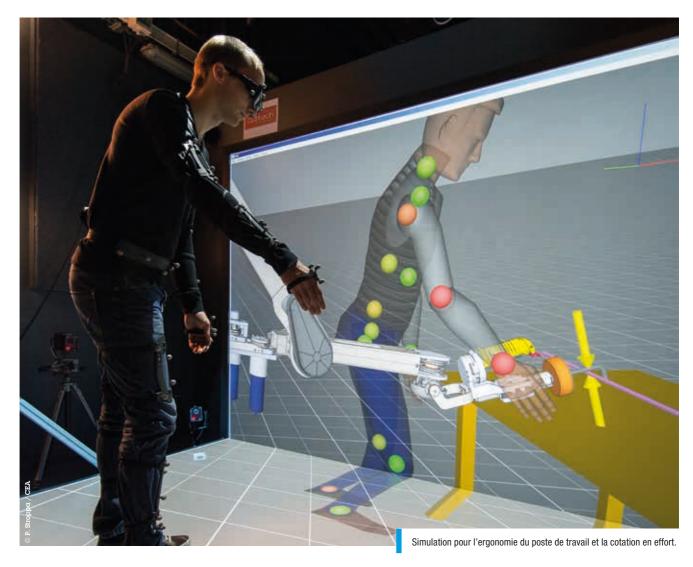
Outil précieux pour améliorer l'ergonomie, la sécurité et l'efficacité des postes de travail, la réalité virtuelle est également utilisée pour concevoir des cobots susceptibles d'assister l'opérateur, voire pour le guider en temps réel.

CAO Conception assistée par ordinateur. valuer la pénibilité d'une tâche sur la chaîne de travail ou contrôler l'efficience d'un geste ; concevoir les robots les mieux à même d'assister un opérateur humain et évaluer ensuite les gains en terme de confort ; suppléer le réel afin d'optimiser une

activité ou en assurer la sécurité : plus aucune de ces activités ne se conçoit aujourd'hui sans un recours intensif aux outils de réalité virtuelle, dont ceux développés par le CEA-List pour simuler sur ordinateur toutes les étapes d'un processus industriel.

#### Un opérateur virtuel, dans un environnement virtuel, pour valider l'ergonomie de son poste de travail

Sur le papier, le principe paraît simple. Il s'agit d'intégrer dans une simulation, un environnement virtuel des assemblages ou machines décrites par leur modèle CAO, et un opérateur virtuel biomécanique, puis d'animer le tout en respectant les lois de la physique (calcul des mouvements, détection et gestion des contacts, simulation des déformations...). Avec un objectif précis: le rendu immersif et interactif du poste



#### Usine du futur : le numérique booste le poste de travail



de travail afin de s'assurer virtuellement que le montage d'une pièce est effectivement réalisable, ou l'observation des conséquences pour l'opérateur d'un geste pénible et/ou répétitif. Un exemple? En 2012, la collaboration en réalité virtuelle entre Renault et le CEA-List visait la simulation du poste de montage d'une partie du banc moteur : « à l'aide d'un tracking de l'opérateur en situation réelle, nous avons simulé l'ensemble du poste, intégrant un mannequin dynamique (avatar de l'opérateur) qui permettait de valider les problématiques d'accessibilité et d'en déduire la cotation ergonomique, c'est-à-dire le niveau de pénibilité de la tâche », explique Laurent Chodorge, responsable du Laboratoire simulation interactive au CEA-List. Cette possibilité, le constructeur automobile l'a également utilisée à des fins de communication sur la prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) en faisant manipuler des pare-brise par un mannequin dynamique et en affichant les efforts articulaires associés.

Mis à profit dans le cadre de collaborations entre le CEA-List et ses partenaires industriels, certains des outils développés dans l'équipe de Laurent Chodorge sont ainsi transférés vers HRV, une PME spécialisée en réalité virtuelle. Son offre ErgAudit aide à la cotation ergonomique afin d'identifier

les causes d'apparition de TMS à partir d'une situation réelle de poste de travail. De son côté, ErgDesign permet de valider virtuellement la conception d'un poste.

#### Au service de la conception des cobots et du guidage, temps réel, de l'opérateur

Cette démarche, systématiquement utilisée aujourd'hui, a naturellement été appliquée à la conception d'un cobot pour la mise en forme de fils d'acier. « Cette tâche est physiquement pénible et demande par ailleurs une forte répétabilité. Pour autant, d'un modèle de flexible à l'autre, elle est assez variable et ne peut donc pas être confiée à des robots autonomes », explique Xavier Lamy, chef du projet au CEA-List. Après avoir simulé la tâche sans assistance pour

en analyser l'ergonomie et la pénibilité, il est possible de proposer un concept de cobot. Sous une forme virtuelle, celui-ci est alors intégré à la simulation afin de tester, sur l'avatar, la solution optimale. De quoi in fine permettre à un opérateur bien réel de tester la solution retenue par immersion dans le monde virtuel, avant de passer à la réalisation d'un prototype. Dans certains cas, la réalité virtuelle peut même enrichir l'offre d'assistance d'un cobot. Concrètement, la simulation d'une tâche s'exécute en parallèle de sa mise en œuvre réelle. Des guides virtuels, intégrés à la simulation, permettent alors d'assister les gestes de l'opérateur et de rendre la manipulation plus simple et plus fluide. Il est également possible d'empêcher certains mouvements dangereux pour l'opérateur ou l'environnement.

Une telle fonction a récemment été implémentée sur le COBOMANIP développé avec Sarrazin Technologies. « La simulation s'exécute aussi vite que le contrôleur du robot, précise Olivier David, chef de projet en robotique. Il est alors possible de soulever des objets lourds en toute tranquillité sous le regard bienveillant de la simulation. » Avec, à la clé, un gain de productivité à court terme et la perspective de repenser la façon de produire dans un environnement « fragile ». L'ingénieur-chercheur ajoute : « le système est en phase de test auprès de différents industriels et pourrait être en production dès la fin de l'année. » De quoi faire de l'usine virtuelle une idée plus vraie que nature! ◆

#### Tracking

Suivi, à l'aide de caméras par exemple, des mouvements d'une personne.

#### La vidéo au service de la qualité

Comment optimiser l'interaction d'un opérateur et d'un cobot ? Ou bien détecter un dysfonctionnement sur une chaîne de travail et raientir sa cadence afin de laisser le temps à l'opérateur d'intervenir ? Ces problématiques, le CEA-List y répond en développant des technologies d'analyse d'image capables d'identifier en temps réel l'avancement et la bonne réalisation d'une tâche. Cette innovation suscite en particulier l'intérêt des constructeurs aéronautiques et automobiles. De quoi mettre le contrôle qualité à simple portée d'une caméra.

Usine du futur : le numérique booste le poste de travail

## La **réalité augmentée** enrichit le poste de travail

Lunettes vissées sur le nez, l'opérateur regarde la pièce à assembler. Un doute sur le positionnement des 50 vis à ajuster ? L'ordinateur communique immédiatement la réponse en superposant à la réalité une image de la scène agrémentée d'informations textuelles et iconographiques. Un exemple de l'apport de la réalité augmentée au poste de travail, domaine dans lequel le CEA-List a récemment proposé des innovations de rupture.

e concept de réalité augmentée n'est pas nouveau. Mais les images étaient souvent instables, mal calées, sur des écrans peu ergonomiques... Les solutions proposées dans les années 2000 sont alors restées lettres mortes dans l'industrie. Depuis, la puissance des ordinateurs a augmenté, les écrans sont de meilleure qualité et de nouvelles interfaces optiques ont vu le jour.

#### Quand le réel et le virtuel collaborent pour optimiser le poste de travail

De leur côté, les chercheurs du CEA-List ont développé un concept de tracking vidéo sans équivalent. « Classiquement, on superpose une image virtuelle à la réalité en calant la caméra à partir de cibles connues disposées dans l'environnement », rappelle Patrick Sayd. À l'inverse, la méthode consiste ici à utiliser directement des caractéristiques visuelles des objets d'intérêt pour se repérer. Précisément : la caméra « regarde » la scène et repère sur l'équipement « à augmenter » les traits saillants :

arêtes, coins, cercles... Ces informations sont corrélées à celles contenues dans le modèle CAO (modèle virtuel issu de la conception de l'équipement). « Grâce à des algorithmes très perfectionnés, notre technologie permet alors en temps réel de calculer la position exacte dans laquelle se trouve la caméra, donc l'angle sous lequel est regardée la scène. Il est alors possible d'y superposer des informations au plus juste », explique le scientifique.

L'origine du projet remonte à 2003 et son aboutissement, en 2009, a conduit à la création de la start-up Diotasoft, exploitant exclusif des innovations du CEA-List en la matière. Parmi ses clients: Dassault, Air liquide ou encore Air France. Patrick Sayd ajoute: « La solution proposée par Diotasoft n'a pas d'équivalent pour les applications dans l'industrie. » Meilleure preuve: elle a été adoptée par des industriels majeurs en France et en Europe.

## Fournir à l'opérateur la bonne information au bon moment

À plus long terme, les spécialistes du CEA-List imaginent être en mesure de renvoyer vers le poste de travail n'importe quelle information issue des bases de données de l'entreprise. Objectif: repérer un défaut sur une pièce à partir de l'historique de ceux constatés sur toutes les autres pièces semblables produites dans toutes les usines du groupe. Comment ? Grâce à de puissants outils d'analyse d'image couplés à des algorithmes d'apprentissage à base de réseaux de neurones. « C'est de l'analyse statistique très large échelle, permettant de corréler des informations, des événements difficiles à rapprocher a priori, ajoute Patrick Sayd. Et, à terme, on peut imaginer étendre la "fouille" à l'ensemble de la documentation iconographique et textuelle de l'industriel. Nos technologies vont dans ce sens... La question est désormais de les intégrer dans l'usine du futur. » En regardant à travers ses lunettes, la réalité de l'opérateur sera alors potentiellement augmentée de l'intégralité de la mémoire de son entreprise! •



#### CEA-Let

Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information

#### **CEA-DEN**

Direction de l'Énergie nucléaire

#### 20 SCIENCES EN BREF

#### Microélectronique

## Éviter la surchauffe des serveurs

Réduire la consommation des serveurs de calcul haute performance sans perdre en performance: une innovation déterminante pour les usagers scientifiques et industriels de simulation numérique. Développé avec STMicroelectronics, le nœud de calcul GAIA du CEA-Leti propose une efficacité énergétique de 7,5 GFlops par watt, quatre fois supérieure à celle des nœuds d'Intel. « Notre circuit, découpé en quatre processeurs de huit cœurs de calcul, s'appuie sur des technologies conçues pour des applications embarquées: substrats FDSOI, cœurs de processeurs ARM 64 bits », indique Jérôme Martin du CEA-Leti. BP

#### Nœud de calcul

Ordinateur ou serveur indépendant composé de plusieurs processeurs.

#### Note:

1. Technologie de transistors à film mince de silicium développée par le CEA et STMicroelectronics.

#### Notes:

1. Voir Nature
Materials 2015
(10.1038/
NMAT4340).
2. Sur le Très
grand centre de
calcul du CEA,
géré par Genci.
3. Leurs
structures
électroniques
et leur réseau
cristallin sont

très proches

#### Dislocation

Défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline.

#### Matériaux

## Les faux amis titane et zirconium

Contre toute attente, le titane et le zirconium réagissent différemment aux contraintes mécaniques. Une découverte<sup>1</sup> aux enjeux technologiques importants car les alliages de ces métaux sont couramment utilisés dans les industries nucléaire et aéronautique. De plus, ces travaux du CEA-DEN, du CNRS et de l'université de Lyon rendent désormais possible la modélisation prédictive, sur des bases physiques robustes, du comportement plastique de ces alliages. Pour affiner leur connaissance sur ces métaux cristallins aux propriétés pourtant semblables<sup>2</sup>, les chercheurs ont couplé expérimentation par microscopie et simulation. « En étirant des échantillons purs à différentes températures (entre -170 °C et 20 °C), nous avons constaté deux types de mouvements de dislocations: dans le titane, elles ont un mouvement saccadé transitant par différents plans, alors que dans le zirconium elles glissent continûment dans un unique plan » détaille Emmanuel Clouet du CEA-DEN. Le cœur de ces dislocations a ensuite été modélisé sur le supercalculateur Curie<sup>3</sup>. Verdict : deux configurations, l'une mobile et l'autre pas, existent dans ces métaux, mais avec une stabilité différente ; les dislocations les plus stables dans le titane étant très peu mobiles. AG



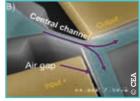
#### Microélectronique

#### Une balance à particules du CEA pour le MIT

1500

NOMBRE D'EXEMPLAIRES DE MICRO-RÉSONATEURS LIVRÉS PAR LE CEA-LETI AU MIT

Sensor



Les faits remontent à 2014 mais sont restés confidentiels près d'un an. Un laboratoire de biologie du Massachussetts Institute of Technology (MIT) a fait appel au **CEA-Leti** pour réaliser des microrésonateurs d'une extrême complexité. Les premiers tests ayant donné toute satisfaction, le MIT a décidé de changer de fondeur pour commander au CEA-Leti 1500 exemplaires qui viennent tout juste d'être livrés.

Ces résonateurs sont constitués d'une microscopique poutre dont une extrémité est libre, pouvant vibrer de haut en bas à plusieurs centaines de kilohertz. À l'intérieur, sont incrustés des microcanaux (3 à 10 microns) dans lesquels peut s'écouler un fluide. « Lorsqu'une particule y circule, la fréquence de vibration de la poutre change, explique Vincent Agache, chef du projet au CEA-Leti. Ce changement permet non seulement de compter les particules mais aussi de les peser au femtogramme (10<sup>15</sup> gramme) près et de les caractériser. » Par exemple, les cellules tumorales, plus rigides que les cellules saines, mettent plus de temps à franchir le canal de 3 microns, révélant ainsi leur nature.

Pour les chercheurs, ce micro-résonateur est un des objets les plus techniques qu'ils aient jamais réalisés. « La fabrication a nécessité 150 étapes en salle blanche », précise Vincent Agache. Le succès a en outre permis de renforcer leurs liens avec le MIT. Même s'ils n'oublient pas leur propre feuille de route : des micro-résonateurs au design différent ont d'ores et déjà été brevetés. FD

#### CEA-Irfu

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers

#### **LSCE**

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

#### Communications

## LINC, l'esperanto du bâtiment intelligent



Comment exploiter et coordonner des systèmes et capteurs pour bâtiment intelligent qui utilisent différents protocoles de communication? Dans le cadre du projet européen Scuba, le CEA-Leti a résolu le problème avec son middleware de coordination LINC. Celui-ci permet d'échanger des informations (température, hygrométrie...) entre plusieurs systèmes quelle que soit leur technologie, par exemple pour piloter la ventilation à partir des données de capteurs de présence. « Testé sur cinq sites, LINC intéresse plusieurs industriels et une start-up est à l'étude » indique Suzanne Lesecq, responsable du projet FP7 SCUBA au CEA-Leti. BP

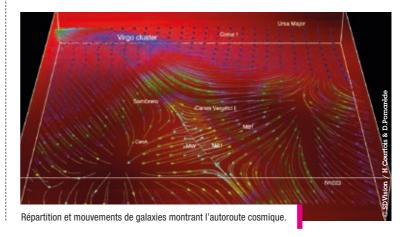
#### Middleware de coordination

Couche logicielle permettant de rendre cohérente l'interaction entre différentes applications informatiques.

#### Astrophysique

## Une autoroute cosmique pour les galaxies

Il y a quelques mois, une équipe internationale impliquant le CEA-Irfu définissait et cartographiait Laniakea, super-continent extragalactique dans lequel réside notre galaxie, la Voie Lactée. Ces mêmes chercheurs s'intéressent aujourd'hui au trafic galactique, précisément à celui des galaxies satellites qui tournent autour de leurs hôtes, les grandes galaxies spirales... et découvrent une super autoroute cosmique qu'emprunteraient ces petits satellites pour atteindre leur but et se mettre en orbite. Issue de l'observation, depuis 2006, des mouvements autour de la Voie Lactée, d'Andromède et de Centaure A (galaxies voisines), l'existence de cette route toute tracée va à l'encontre de certaines théories. « Nous pensions jusqu'ici que les galaxies satellites se déplaçaient dans l'espace de manière aléatoire, sans direction préférentielle. En réalité, elles suivent l'architecture de la matière à plus grande échelle en prenant des petits chemins, sortes de voies d'insertion, jusqu'à cette autoroute cosmique » expliquent Hélène Courtois, de l'IPN et de l'université de Lyon, à l'origine du projet, et Daniel Pomarède, ingénieur-chercheur au CEA-Irfu qui a développé le logiciel de visualisation. La cartographie des mouvements révèle que cette autoroute est un pont de matière qui s'étend depuis notre groupe local de galaxies, jusqu'à l'amas de galaxies de la Vierge. AL





#### Climatologie

## Méditerranée: des eaux de plus en plus acides

Une nouvelle étude dirigée par le LSCE offre les premières simulations détaillées de l'acidification de la Méditerranée: entre 1800 et 2001, elle aurait absorbé entre 1 et 1,7 milliard de tonnes de carbone issu des activités humaines; son Ph diminuant de 0,08 unité, soit une augmentation de 20 % de son acidité (concentrations en ions  $H^+$ ). « Cette évolution est similaire à celle des océans, bien que l'absorption du  $CO_2$  anthropique soit plus intense en Méditerranée » constate James Orr, coordinateur CEA du projet qui ajoute que « l'acidification du fond de la Méditerranée est plus élevée que celle des océans profonds, à cause de son renouvellement rapide, par exemple dans le Golfe du Lion ». AG

#### 22 SCIENCES EN BREF

#### CEA-DEN

Direction de l'Énergie nucléaire

#### CEA-Leti

Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information

#### lmagerie

## Booster la sensibilité des gamma-caméras

Repérer un explosif dans un bagage, ou une tumeur dans un organisme. Les détecteurs à semi-conducteur des gamma-caméras révèlent de véritables prouesses techniques mais appellent des résolutions encore plus fines. Une équipe du CEA-Leti et du CEA-Irfu propose un bond en avant: « La **résolution en énergie** de notre détecteur est tombée à 2,5 %, contre 10 % pour les appareils les plus répandus, et la résolution spatiale est passée de 3 mm à 0,3 mm », précise Guillaume Montémont, du CEA-Leti. Leur innovation repose sur un circuit électronique « à bas bruit »: très sensible et très précis, il est allié à des algorithmes de traitement du signal poussés. « Notre système exploite plus de données. Lorsqu'une particule gamma frappe le détecteur, elle est localisée non seulement par l'électrode concernée mais aussi par ses voisines qui perçoivent aussi un très faible signal. »FD



#### Nucléaire du futur

## Les premiers tubes aux spécifications d'Astrid

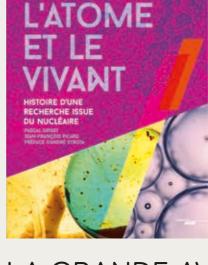
Six tubes de **gaine** en acier « 15-15Ti AIM1 » viennent d'être fabriqués, par les équipes du CEA-DEN, aux spécifications et dimensions d'Astrid, projet de démonstrateur de réacteur de 4º génération à neutrons rapides refroidi au sodium. Épais de 500 microns, ils résultent de plusieurs années de recherche pour concevoir cet acier aux tolérances de composition chimique très serrées, notamment sa résistance au gonflement sous fortes doses. Des tests, en particulier de soudage du bouchon, seront alors réalisés afin de valider la faisabilité de fabrication des aiguilles prototypes. Ensuite, la fabrication des premiers lots industriels représentatifs sera engagée avec des sociétés partenaires. *AG* 

#### Résolution énergétique

Mesure de l'énergie émise par les photons gamma, permettant de reconnaître leur « couleur », et ainsi obtenir une image contrastée en fonction de la résolution

#### Résolution spatiale

Mesure de la position d'un objet (ici des photons gamma), plus ou moins fine dépendant de ladite résolution.



#### LA GRANDE AVENTURE DES SCIENCES DU VIVANT AU CEA

Créée en 1990, la Direction des sciences du vivant du CEA fête ses 25 ans ! Mais l'histoire des sciences du vivant dans l'organisme remonte à son origine, en 1945. Cet ouvrage présente la spécificité des études menées sur

le vivant par et pour le nucléaire. Il retrace par ailleurs les principales évolutions,

la logique et la cohérence des recherches réalisées au CEA dans les domaines de la santé, de l'environnement et de l'énergie. De plus, il expose les grandes innovations en neurosciences, imagerie médicale, cancérologie, immunologie, radiobiologie et toxicologie. Ainsi, les auteurs, spécialistes de l'histoire des sciences, montrent à quel point le rôle des sciences du vivant au CEA s'est accru au fil des années. Un développement qui se poursuit dans un contexte international, avec des impératifs de compétitivité, d'excellence et d'innovation.



25€



laquelle sont empilées les pastilles de combustible.

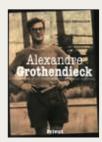


#### Abonnement gratuit

Vous pouvez vous abonner sur:

http://cea.fr/defis ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, actresse et profession à Les Défis du CEA – Abonnements. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.

#### L'HOMME, LE GÉNIE ET LE MYSTIQUE



Novembre 2014, Alexandre Grothendieck rendait son dernier souffle, à l'âge de 86 ans. Peu connu du grand public, il était pourtant considéré comme l'un des plus grands génies des mathématiques du XX° siècle, ses pairs le situant au niveau d'Albert Einstein. Fils d'un anarchiste russe et d'une journaliste allemande, il se voit attribuer la médaille Fields en 1966. C'est à cet homme au destin hors du commun que l'auteur rend hommage, décrivant une personne de conviction, anarchiste, mystique, qui finit par se couper du monde.

Alexandre Grothendieck, Itinéraire d'un mathématicien hors normes. Georges Brinquier.

Éditions Privat. 18€

#### LA SCIENCE ABRACADABRANTESOUE!



La barbe fait-elle une bonne crème solaire ? Que se passe-t-il lorsqu'on donne du LSD à un éléphant ? Et de la vitamine D à des dragons ? Le morpion est-il en voie de disparition ?... À questions farfelues, réponses méthodiques ! Créateur du blog « Passeur de sciences », le journaliste indépendant est aussi l'auteur de chroniques dans le supplément *Science & Médecine du Monde.* Ce troisième volume du Dr. Bart en est une sélection.

La science improbable du Dr Bart. Pierre Barthélémy, illustr. Marion Montaigne. Éditions Dunod/Le Monde. 14,90€

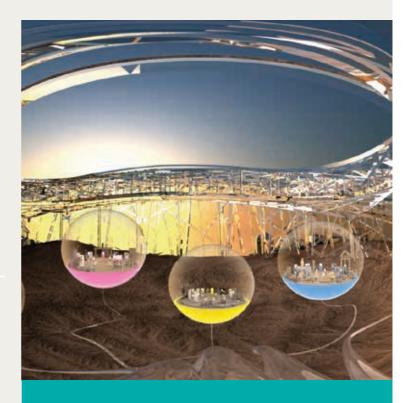
#### À LA DÉCOUVERTE DES COMÈTES



Novembre 2014, la sonde européenne Rosetta se pose sur une comète lointaine. Une prouesse technologique qui permettra de dévoiler quelques mystères entourant encore ces objets célestes. Mais comment les scientifiques ont-ils découvert le secret de leur trajectoire? Que savons-nous de leur origine? En six chapitres, les auteurs présentent un récit original et émaillé d'anecdotes. Notamment, la traque fébrile qui s'est organisée à l'occasion de la réapparition de la célèbre comète de Halley en 1986.

À la rencontre des comètes, De Halley à Rosetta. James Lequeux et Thérèse Encrenaz.

Éditions Belin, Pour la science. 22,90€



#### Exposition virtuelle Memorya

## Comment fonctionne la mémoire?

Comment l'entretenir ? Pourquoi avons-nous des trous de mémoire ?... Mise en ligne début juillet, Mémorya est la première exposition virtuelle dédiée à cette grande faculté de l'esprit. De la mémoire individuelle et collective à la mémoire numérique, en passant par la mémoire animale, cette œuvre interactive présente de manière ludique toutes ses facettes, le tout en s'appuyant sur les recherches de nombreux chercheurs nationaux et internationaux. Destinée au grand public, Mémorya propose des tests, quiz et vidéos pour une visite ludique, dans une esthétique très travaillée. Développée par l'association française Art'm Créateurs Associés, avec le soutien du neurologue Francis Eustache, Mémorya est l'adaptation numérique d'une exposition itinérante intitulée « MEMOIRE/S », découverte par plus de 50000 visiteurs dans plusieurs villes de France. Il est à noter qu'elle est accessible aux sourds et aux malentendants. http://www.memorya.org



Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies atternatives, R. C. S. Paris B77568019 | **Directeur de la publication** Xavier Clément | **Rédactrice en chef** Aude Ganier | **Rédactrice en chef** Aude Ganier | **Rédactrice en chef** adjointe Amélie Lorec | **Ont contribué à ce numéro**: Fabrice Demarthon, Mathieu Grousson, Benoît Playoust et Vahé Ter Minassian | **Comité éditorial** Andrew Chilton, Alexandra Bender, Vincent Coronini, Claire Abou, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi, Isabelle Dellis | **Iconographie** Micheline Bayard | **Infographie** Fabrice Mathé | Photo de couverture CEA | Diffusion Lucia Le Clech | **Conception et réalisation** www.grouperougevif.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier Satimat, issu de forêts gérées durablement. JF Impression.



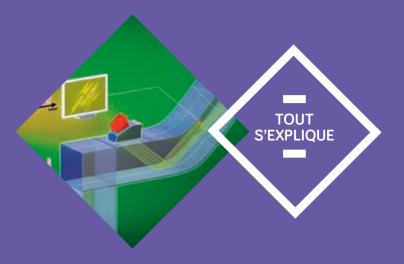
# XYZ

# A V E C L A L U M I È R E

Exposition immersive de Adrien M / Claire B du 9 juin 2015 au 3 janvier 2016

Contempler, danser, se perdre dans les volumes... grâce à une dizaine d'œuvres numériques qui invitent à interagir et jouer avec la lumière! Le tout placé sous le code XYZT, décrivant le mouvement d'un point dans l'espace. Poétique, onirique... et mathématique!





## Le contrôle non destructif par ultrasons

Grâce à eux, les dauphins perçoivent leur environnement, les médecins réalisent des échographies...

Les ultrasons sont également utilisés pour le contrôle non destructif (CND) de pièces industrielles, dans leur volume ou en surface, sans nuire à leur intégrité. Cela consiste à émettre des ondes acoustiques et à détecter leurs interactions avec des défauts présents dans la pièce. Les ondes réémises, tel un écho, sont alors converties, en temps réel, en une image numérique du défaut ainsi localisé et caractérisé.

### ENJEU SOCIÉTAL &



Contrôler, sans les altérer, des pièces en sortie d'usinage ou lors de maintenance, pour déceler des défauts dans des matériaux, effectuer des mesures de corrosion, vérifier la conformité des soudures, etc. Tels sont les enjeux du CND par ultrasons qui innove depuis une dizaine d'années avec le développement, notamment au CEA, des techniques de détection « multi-éléments ».

Il peut ainsi se déployer dans des milieux industriels complexes, comme le nucléaire, l'aéronautique ou la pétrochimie, dont la qualité et la sûreté des infrastructures constituent des enjeux majeurs.

Le CND est l'une des composantes du « manufacturing avancé », technologie générique clé destinée à mettre en œuvre l'industrie du futur.

## Le contrôle non destructif par ultrasons

#### PRINCIPE 📆

Méthode non-invasive de détection de défauts dans une pièce, basée sur l'émission d'ultrasons et la détection de leur réflexion liée aux interfaces acoustiques rencontrées.

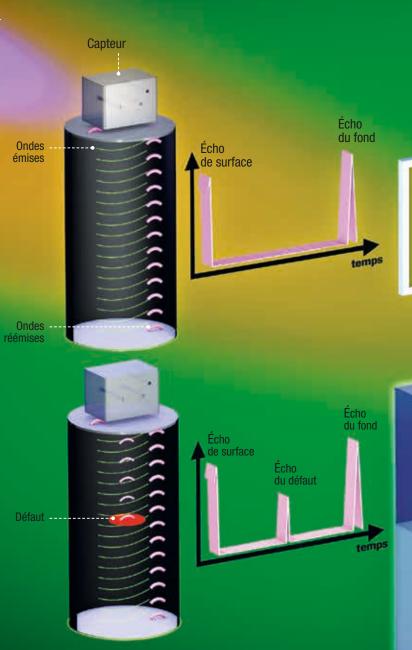
#### Émission

Un capteur équipé d'éléments piézoélectriques émet des ultrasons à une fréquence (entre 500 kHz et 100 MHz) choisie en fonction de la nature de la pièce à contrôler. Il doit être en contact direct avec la pièce pour que les ondes propagées ne soient pas freinées par l'impédance de l'air entre les deux; en immersion dans de l'eau qui est un bon conducteur acoustique. Grâce au pilotage électronique de l'orientation et des caractéristiques du faisceau ultrasonore, la technologie multi-éléments est adaptée au contrôle de pièces à géométries complexes.

#### Réflexion

Les ondes se réfléchissent sur les interfaces acoustiques rencontrées : contours de la pièce, défauts intérieurs voire grains des matériaux. Selon la loi de Snell-Descartes, la réflexion observe un angle particulier.

Les ondes subissent également d'autres phénomènes au cours de leur propagation dans la matière (diffraction, atténuation...).







#### Ultrasons

Ondes acoustiques comprises entre 20 kHz et 10 GHz. Fréquences trop élevées et aiguës pour être perçues par l'oreille humaine (ondes audibles entre 20 et 20 kHz), d'où leur nom.

#### Piézoélectrique

Propriété de dilatation et de contraction d'un élément, aux extrémités duquel est appliqué un différentiel de potentiel électrique, qui engendre des ondes acoustiques.

#### Impédance

Résistance d'un milieu au passage d'une onde. Les ondes acoustiques se propagent dans l'air à 340 m/s; dans l'eau, à 1500 m/s; dans l'acier, à 5900 m/s. Plus la différence d'impédance est faible entre les milieux, mieux l'onde est transmise.

#### Loi de Snell-Descartes

Loi d'optique utilisée en acoustique géométrique pour décrire le comportement d'une onde à l'interface entre deux milieux.

#### Détection

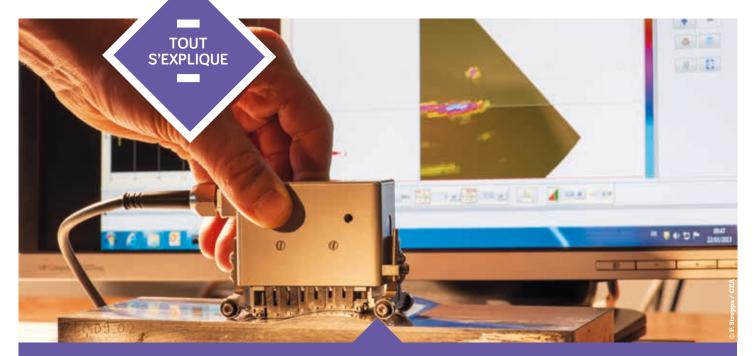
du défaut

Le capteur, placé au contact de la pièce à inspecter, évolue suivant une trajectoire calculée pour intercepter les ondes réémises par un éventuel défaut.

Lors d'une inspection à l'aveugle d'une pièce, le capteur est déplacé en surface pour explorer un grand volume de matériau. Le pilotage électronique, et non mécanique, des capteurs multi-éléments permet de réaliser des inspections à grande vitesse (cas du balayage angulaire des échographies médicales).

#### Visualisation

Les ondes détectées sont converties en signaux par l'électronique associée du capteur. Un logiciel assemble ces signaux pour former une image de l'intérieur de la pièce. L'analyse des images permet de discriminer les échos dus à un défaut de ceux liés à la géométrie de la pièce.



### DÉFIS 🎾

Optimiser la conception des capteurs ; choisir la fréquence adaptée aux matériaux contrôlés ; atténuer les échos parasites provenant de la pièce ; calculer les trajectoires de contrôle optimales... Pour relever ces défis du contrôle non destructif par ultrasons, les chercheurs ont notamment recours à la simulation numérique.

#### Les recherches continuent

#### Des équipements high-tech

Le CEA-List s'est doté de Gerim, plateforme d'équipements très innovants pour le contrôle non destructif (CND). Il s'agit de développer, avec les partenaires académiques et industriels, de nouvelles méthodes d'inspection : génération d'ultrasons par laser, tomographie par rayons X robotisée, méthodes électromagnéto-acoustiques (EMAT). Grâce aux techniques d'imagerie adaptatives qui intègrent en temps réel les données acquises sur la géométrie de la pièce à contrôler, les chercheurs peuvent ainsi adapter les tirs ultrasonores et les traitements qui leur sont appliqués.

#### L'outil de simulation CIVA

Incontournable pour concevoir les capteurs, qualifier les méthodes d'inspection en CND et analyser les résultats, la simulation repose sur une exploitation intensive de différents codes numériques. Le CEA-List a développé depuis plusieurs années le logiciel CIVA. Basé sur la mise en œuvre de modèles hybrides couplant calculs semi-analytiques rapides et méthodes numériques, il permet de prendre en compte des phénomènes très complexes tout en maintenant des temps de calcul et une facilité d'utilisation compatibles avec les applications visées.

#### Transferts industriels

Les développements du CEA-List en matière de CND par ultrasons donnent lieu à des transferts technologiques, que cela soit *via* des sociétés existantes ou par la création de start-up ou de spin-off.

**Imasonic:** PME française fondée dans les années 1990, leader mondial dans la conception et la fabrication de transducteurs à ultrasons, avec laquelle le CEA-List travaille pour développer des capteurs multi-éléments conformables.

**M2M**: entreprise française qui développe et fabrique, depuis 2003, des chaînes de CND par ultrasons, valorisant notamment les technologies du CEA-List avec qui elle continue de collaborer.

**Extende:** société française créée en 2010 par le CEA-List et Cédrat, afin de commercialiser dans le monde entier, et former des utilisateurs du logiciel CIVA de simulation et d'analyse en CND développé au CEA-List.