

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications



Préparer demain...
et l'après demain

SOMMAIRE

HORS-SÉRIE
70 ans
1945-2015

6 DISSUASION NUCLÉAIRE

Laser haute énergie

Mégajoule pour microcible

7

Calcul haute performance

Tera : super fort en maths

11

16 ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Nucléaire du futur

1, 2, 3, 4, Astrid !

17

Cycle du combustible

Et la boucle serait bouclée

21

Fusion nucléaire

Le Soleil mis en boîte

25

Vecteur énergétique

Hydrogène : atouts pour plaire

27

Efficacité énergétique

En bonne intelligence

35

Stockage d'énergie

Une batterie d'autonomie

31

26 ÉNERGIES ALTERNATIVES

36 RECHERCHE TECHNOLOGIQUE POUR L'INDUSTRIE

Valorisation technologique

Immersion en innovation

37

Innovation ouverte

Du bon usage de la techno

45

Industrie du futur

L'heure numérique a sonné !

41

46 RECHERCHE FONDAMENTALE

Informatique quantique

Le don d'ubiquité

51

Omiques

Du sur mesure pour la santé

47



DANIEL VERWAERDE
Administrateur général du CEA

(...) Poursuivre la construction d'un nucléaire sûr et durable, innover sur des solutions énergétiques renouvelables, déployer en région des structures de transferts technologiques adaptées aux tissus industriels.

« De pressantes nécessités d'ordre national et international obligent à prendre les mesures nécessaires pour que la France puisse tenir sa place dans le domaine des recherches concernant l'énergie atomique ». Ces termes sont ceux de l'introduction de l'ordonnance n° 45-2563 du 18 octobre 1945 instituant un Commissariat à l'énergie atomique. Suit, en son article 1, la formulation de la mission de « *poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale* ».

Depuis 70 ans, ce sont ces missions qui ont guidé l'action de tous les salariés du CEA. Ils peuvent être fiers aujourd'hui d'avoir activement contribué aux grands projets qui ont fait de la France un acteur stratégique majeur, grâce à sa force de dissuasion, et un acteur économique de premier rang, grâce à l'énergie nucléaire. Les recherches sur l'énergie nucléaire ont permis à notre pays de développer un outil industriel de haut niveau, niveau d'excellence et de compétitivité, tout en fournissant à l'ensemble de nos industries et à nos concitoyens une énergie peu chère et n'émettant pas de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, ces missions historiques ont été réaffirmées et déclinées en quatre grands axes de recherche, qui tracent la voie de celles et ceux qui travaillent au CEA pour « *Préparer demain et*

l'après demain » : dissuasion nucléaire, énergie nucléaire, énergies renouvelables et contribution au redressement industriel de la France ; ces missions s'appuyant sur une recherche d'excellence.

Viser pour ces quatre domaines l'alliance de l'excellence scientifique et de la pertinence par rapport aux grands enjeux sociétaux, est le moteur de notre action. Nos avancées scientifiques et technologiques de demain seront le résultat de la performance de nos projets actuels.

L'avenir commence aujourd'hui. Nos tutelles nous ont fixé des objectifs ambitieux dans les domaines de l'énergie et du renouveau industriel, au travers de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, et de la loi pour la croissance, l'activité et l'égalité des chances économiques. Ces lois donnent tout son sens à notre détermination à poursuivre la construction d'un nucléaire sûr et durable, à innover sur des solutions énergétiques renouvelables, et à déployer en région des structures de transferts technologiques adaptées aux tissus industriels.

Curiosité scientifique, audace, rigueur, pragmatisme, honnêteté, telles sont les qualités que nos salariés, équipes de recherche ou équipes de support, mettent au service des projets performants que nous menons. Ces projets donneront à notre pays les moyens de maintenir sa place parmi les grands acteurs internationaux.



YVES BRÉCHET

Haut-commissaire à l'énergie atomique

Une histoire où coexistent la maîtrise des grands projets et la profondeur du savoir scientifique, la rigueur et le pragmatisme, la vision dans la durée et la réactivité, l'ouverture académique et industrielle (...)



Le CEA fête ses 70 ans cette année. 70 ans où il a servi notre pays, en le dotant d'une dissuasion nucléaire, nécessaire dans un monde troublé, et d'une énergie électrique massivement électronucléaire, qui en font un des meilleurs élèves de la planète dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Pour cette mission, il a dû développer au meilleur niveau une recherche fondamentale qui l'a souvent positionné en leader : initiateur de la mécanique quantique en France ; découvreur du magnétisme nucléaire ; pionnier parmi d'autres de la radiobiologie ; cheville ouvrière de la découverte du boson de Higgs...

Par cette mission, il a été précurseur en climatologie et en biologie du vivant. Il a développé des compétences en instrumentation, matériaux, robotique, microélectronique, laser, calcul numérique... Des compétences qui en font un partenaire apprécié du monde académique, par exemple en biologie structurale, en physique des particules, en astrophysique. Depuis quelques années, il contribue à l'essor des nanotechnologies et des énergies renouvelables. Aujourd'hui, comme hier, le CEA met ses acquis au service du développement de l'industrie de notre pays.

Parce qu'il a une telle histoire, le CEA a un avenir. Une histoire où coexistent la maîtrise des grands

projets et la profondeur du savoir scientifique, la rigueur et le pragmatisme, la vision dans la durée et la réactivité, l'ouverture académique et industrielle avec la confidentialité de certaines recherches. Par son histoire, par la mixité d'ingénieurs, de chercheurs, de tous ceux qui facilitent le travail d'équipe qui caractérise le CEA, sa devise *De la recherche à l'industrie* fait sens.

70 ans laissent le temps de diversifier les activités au point que l'élan initial qui les unissait devient difficile à identifier. Un salarié du CEA doit s'interroger sur sa raison d'être au CEA, et donc de se poser la question du lien de son activité à la mission première. Consubstantiel à l'idée d'un organisme doté de missions, et d'un continuum obligé entre recherche fondamentale et démonstrateur technologique, ce lien explique la trajectoire unique du CEA.

Alors, celui-ci n'est plus si grisé par ses succès qu'il en oublierait d'être au service, ou si entraîné par le désir de faire qu'il en perdrait le devoir de comprendre ou qu'il sacrifierait celui de préparer l'avenir pour répondre aux exigences toujours urgentes du présent.

Demain, au service de notre pays, le CEA sera encore pleinement lui-même s'il continue de cultiver l'esprit qui traverse et anime toute son histoire.

LE CEA EN CHIFFRES

16110

SALARIÉS

1504

DOCTORANTS ET 276 POST-DOCTORANTS.

10

CENTRES ET 4 PRIT IMPLANTÉS
DANS 9 RÉGIONS FRANÇAISES

4,3

MILLIARDS D'EUROS BUDGET
CIVIL ET DÉFENSE

5022

PUBLICATIONS EN 2013 DANS DES REVUES
À COMITÉ DE LECTURE

5600

FAMILLES DE BREVETS
ACTIVES

751

DÉPÔTS DE BREVETS PRIORITAIRES EN 2014

Plus de

500

PARTENAIRES INDUSTRIELS DONT 300
DE PLUS DE 50K€/AN

Plus de

760

PROJETS EUROPÉENS OBTENUS AVEC
LA PUBLICATION DU CEA DANS
LE CADRE DU FP7 DEPUIS 2007.

51

UNITÉS DE RECHERCHE
SOUS COTUTELLE DU
CEA ET DE PARTENAIRES
ACADÉMIQUES (45 UMR, 5
UMS, 1 USR)

53

ACCORDS-CADRES EN VIGUEUR
AVEC LES UNIVERSITÉS ET LES ÉCOLES

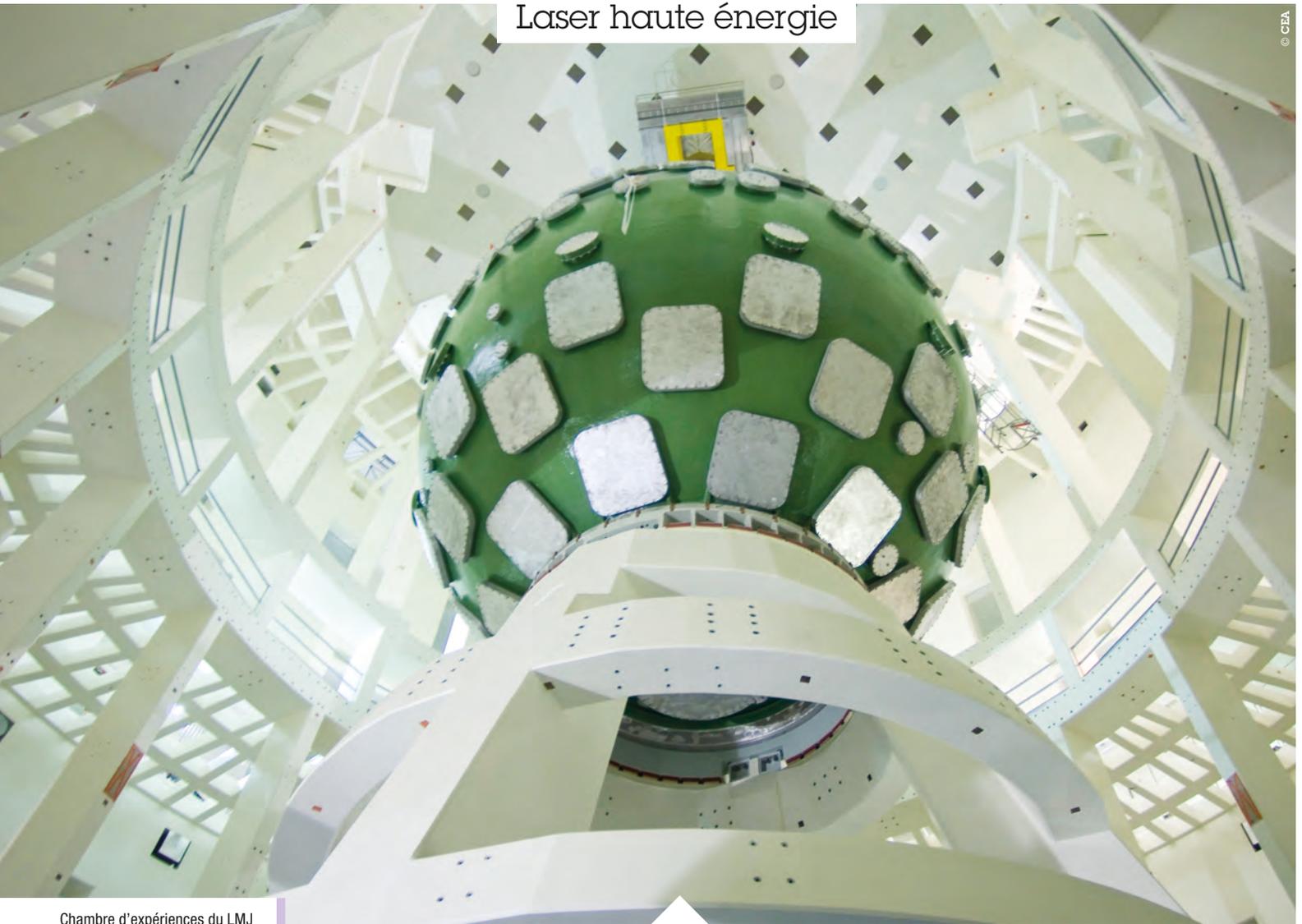
DISSUASION NUCLÉAIRE

En 1996, la France signait le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires et entreprenait le démantèlement de son Centre d'essais du Pacifique.

Depuis, le CEA est chargé de garantir sur le long terme la fiabilité, la sûreté et les performances des têtes nucléaires, sans recourir à de nouveaux essais nucléaires.

C'est l'objet du programme Simulation qui consiste à reproduire par le calcul les différentes phases de fonctionnement d'une arme nucléaire. Les résultats des modèles physiques de simulation sont obtenus grâce au supercalculateur Tera, puis validés par comparaison aux résultats d'expériences spécifiques menées sur l'installation radiographique Epure et le laser Mégajoule.

Laser haute énergie



Chambre d'expériences du LMJ

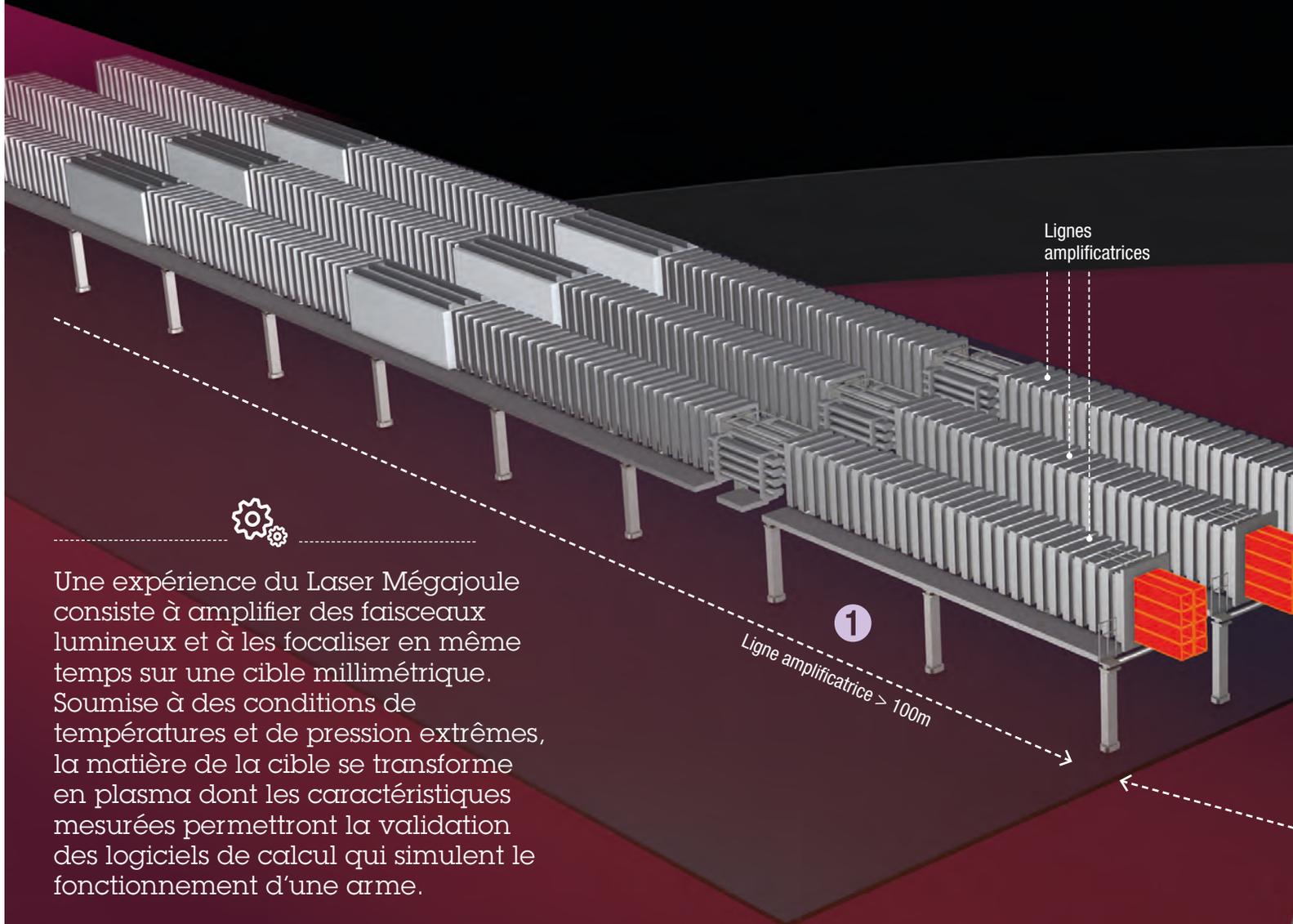
Mégajoule pour microcible

Installé entre Bordeaux et Arcachon et mis en service fin 2014, le Laser Mégajoule (LMJ) est un très grand outil expérimental du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA. Objectif? Étudier, à toute petite échelle, le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes de température et de pression similaires à celles atteintes lors du fonctionnement nucléaire des armes. Pourquoi? Pour valider expérimentalement les résultats des codes de calcul qui simulent le fonctionnement d'une arme nucléaire et affiner les modèles physiques sur lesquels reposent ces simulations. Comment? Le LMJ est dimensionné pour délivrer sur une cible de quelques millimètres, en quelques milliardièmes de seconde, une énergie lumineuse supérieure à un million de joules, produisant ainsi des conditions de température (millions de degrés) et de pression (milliards de fois la pression atmosphérique) qui n'existent qu'au centre des étoiles et lors du fonctionnement des armes nucléaires.

Plusieurs catégories d'expériences sont prévues sur le LMJ pour étudier divers domaines de la physique : interaction laser-matière, comportement de la matière aux conditions extrêmes, instabilités hydrodynamiques, turbulence ou encore fusion thermonucléaire... La première campagne expérimentale, réalisée fin 2014 avec succès, concernait l'interaction du rayonnement X avec la matière. Les résultats des expériences menées sur le LMJ permettent la validation des simulations numériques réalisées sur les supercalculateurs, aujourd'hui sur Tera 100, demain sur Tera 1000.

Le projet LMJ a dynamisé l'activité industrielle d'Aquitaine, notamment par la création du pôle de compétitivité Route des lasers. Par ailleurs, d'ici 2016, cette installation s'ouvrira à d'autres applications que la Défense grâce à la ligne laser Petal. Inaugurée le 18 septembre 2015, celle-ci est destinée à la recherche fondamentale en physique des plasmas, en santé ou en astrophysique.

Le Laser Mégajoule



Une expérience du Laser Mégajoule consiste à amplifier des faisceaux lumineux et à les focaliser en même temps sur une cible millimétrique. Soumise à des conditions de températures et de pression extrêmes, la matière de la cible se transforme en plasma dont les caractéristiques mesurées permettront la validation des logiciels de calcul qui simulent le fonctionnement d'une arme.

1

Création et amplification des faisceaux laser

De premiers photons infrarouges (1 milliardième de Joule) sont produits par des sources laser. Les faisceaux sont ensuite pré-amplifiés, puis amplifiés 8 par 8 par des composants optiques (**amplificateurs**) lors de deux allers-retours dans les longues lignes d'amplification.

2

Transport des faisceaux vers la chambre d'expérience et changement de couleurs

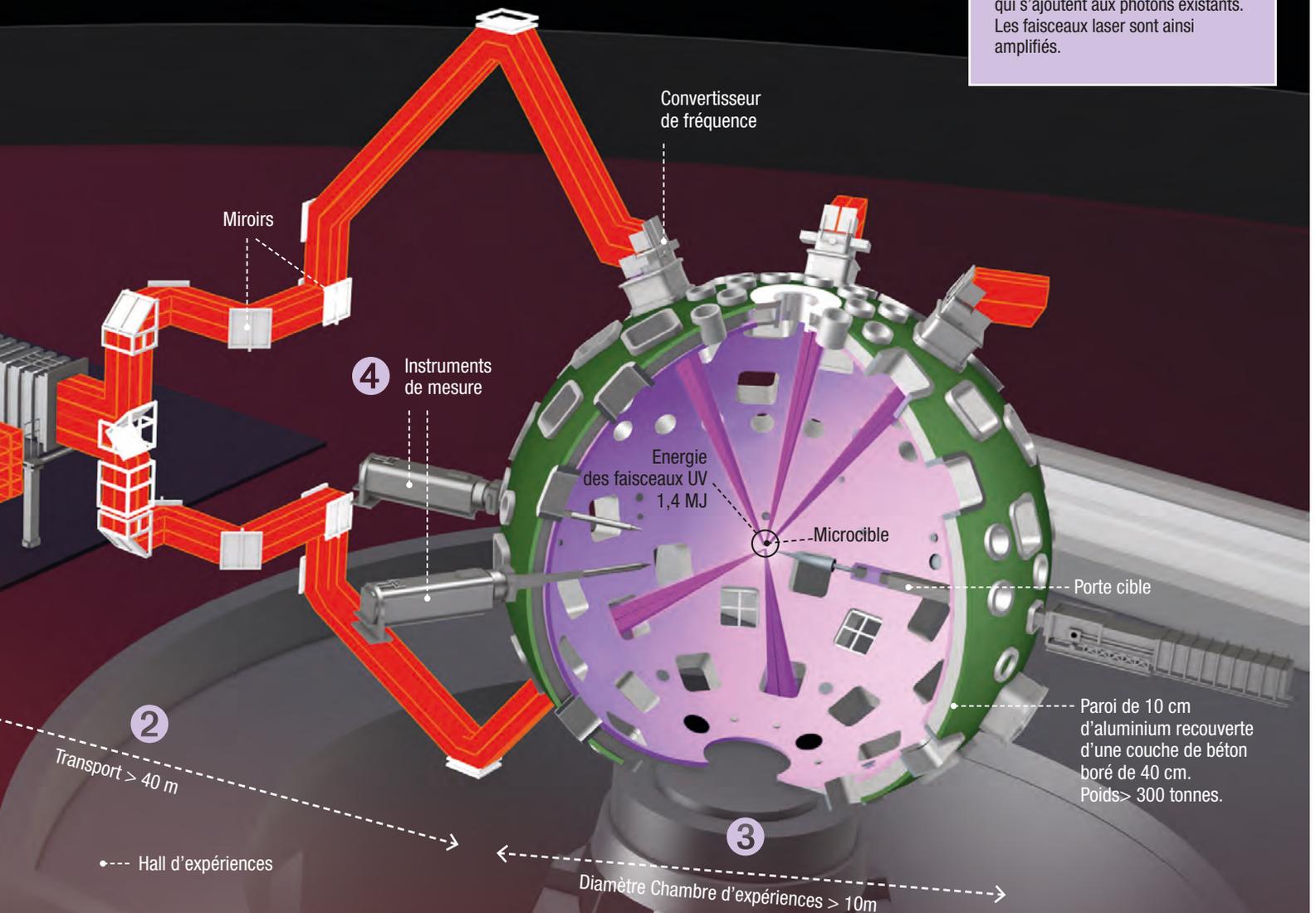
En sortie de la ligne amplificatrice, les faisceaux laser (15 kJ) sont transportés 4 par 4 vers la chambre d'expérience puis traversent un système de conversion de fréquences pour passer de l'infrarouge à l'ultraviolet (8 kJ).

DÉFINITION



Amplificateur

Plaques de verre laser dopées au néodyme qui stockent de l'énergie apportée par des lampes flash. À chaque passage des faisceaux, les atomes de néodyme restituent leur énergie en libérant des photons qui s'ajoutent aux photons existants. Les faisceaux laser sont ainsi amplifiés.



3 Focalisation et impact des faisceaux sur la cible

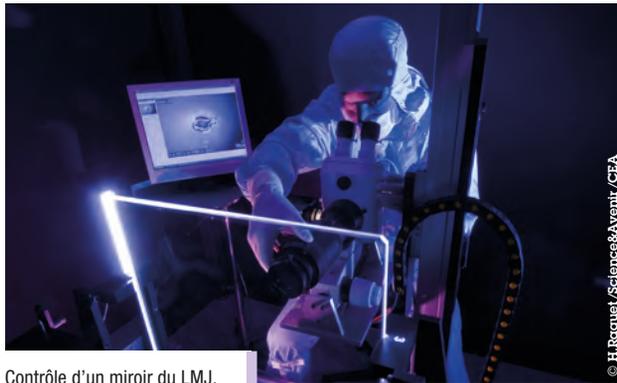
Les 176 faisceaux ultraviolets sont focalisés sur une micro-cible placée au centre de la chambre d'expériences qu'ils atteignent avec une précision spatiale d'un $1/20^{\text{e}}$ millimètre et avec une précision temporelle de 40 millièmes de milliardième de seconde (40 pictosecondes).

4 Recueil des données de l'expérience.

Répartis autour de la chambre, des instruments de mesures, baptisés les « diagnostics », relèvent les caractéristiques de la matière portée à l'état de plasma chaud et dense : spectres, neutrons, densité, température...

Un outil, des défis

Conception du bâtiment, études des technologies lasers et optiques, intégration de dispositifs de mesures... : les défis techniques autour du LMJ sont nombreux. Tous ont été relevés grâce au haut niveau de compétence des équipes d'ingénieurs et de physiciens de la Direction des applications militaires. L'outil est parfaitement opérationnel aujourd'hui avec une première chaîne de 8 faisceaux laser. La montée en puissance de l'installation se poursuit. Les scientifiques doivent également développer de nouvelles cibles avec des matériaux (polymères, capsules de mousse, aérogels) et des géométries spécifiques. Une démarche qui repose sur des savoir-faire en micro-technologies, nano-technologies et physique-chimie des matériaux. Les innovations continuent aussi dans les domaines des capteurs de mesure : plus rapides, mieux résolus dans le temps et en mesure de longueurs d'onde de rayonnement.



Contrôle d'un miroir du LMJ.

© H. Roguet/Science&Avenir/CEA

Des retombées industrielles

Pour la réalisation des bâtiments et les études sur les composants critiques ou les technologies innovantes du laser, le CEA a fait appel aux grands industriels français et PME de haute technologie dans plusieurs domaines : génie civil, laser, optique, mécanique, électronique, mesure, informatique industrielle. Les capacités acquises et maîtrisées par ses sociétés sont aujourd'hui utilisées pendant la phase d'exploitation du LMJ. Par ailleurs, l'implémentation de ce grand instrument de simulation dynamise la région Aquitaine avec, depuis 2002, le développement du projet régional Route des lasers. Labellisé pôle de compétitivité en 2005, il s'articule autour de la formation, de la recherche, du transfert technologique et de l'activité industrielle dans les domaines de l'optique et des lasers.



UN PEU D'HISTOIRE

1962

Premier programme laser au CEA-DAM

1976

Mise en service du laser P102

1977

Mise en service du laser OCTAL

1985

Premier tir du laser PHEBUS

1990

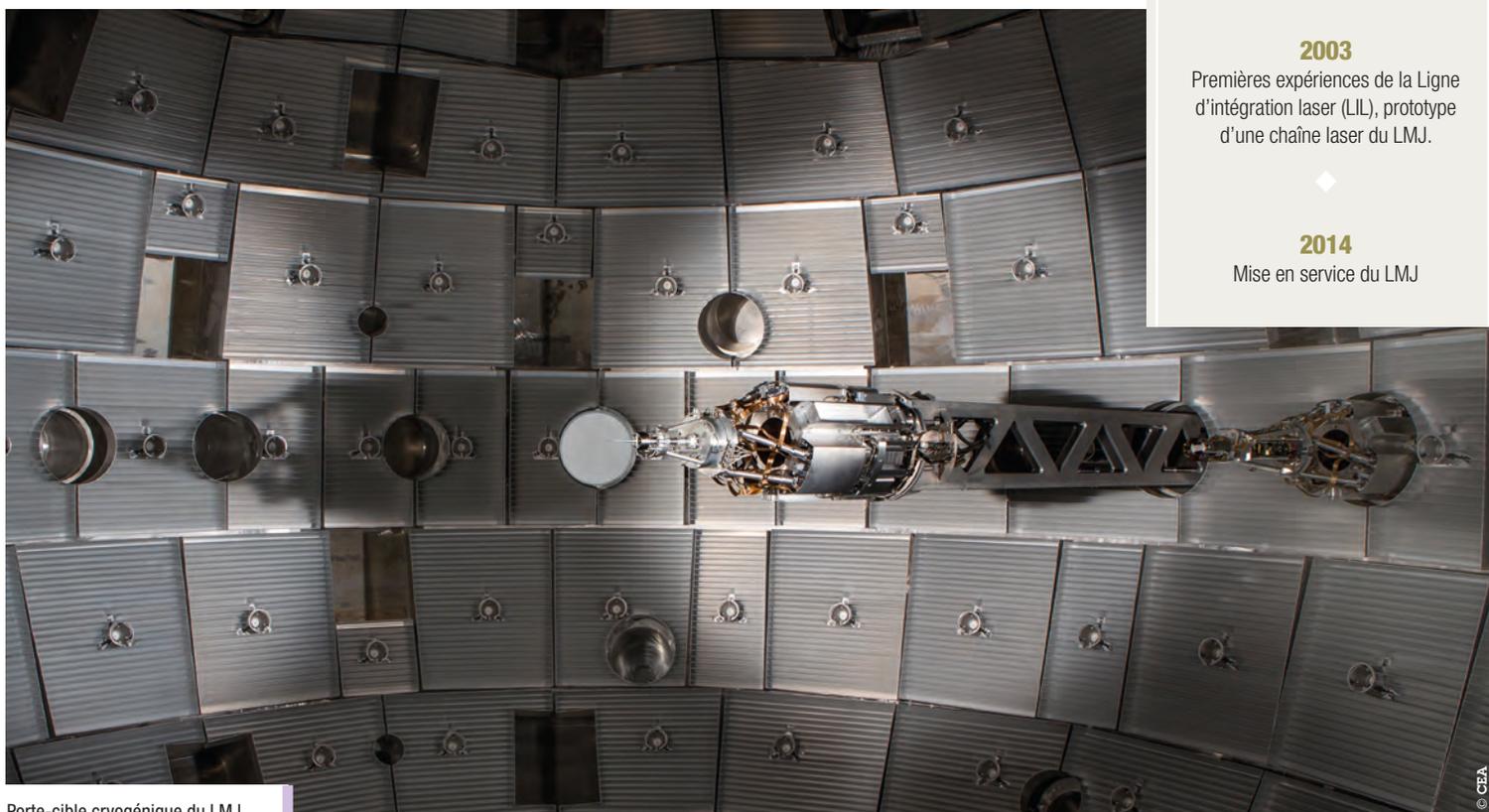
Record mondial de puissance avec P102 (20TW en 1,2 ps)

2003

Premières expériences de la Ligne d'intégration laser (LIL), prototype d'une chaîne laser du LMJ.

2014

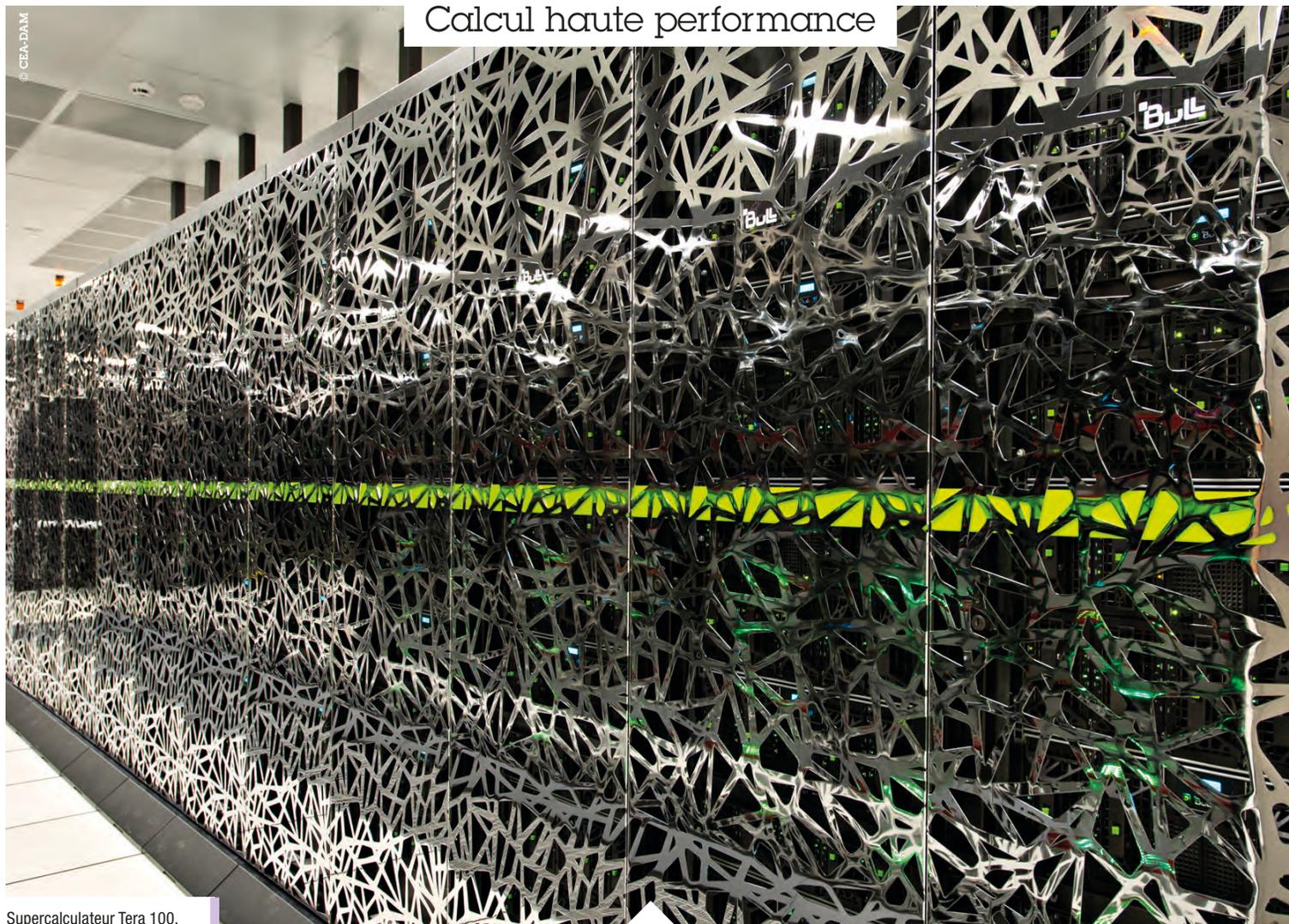
Mise en service du LMJ



Porte-cible cryogénique du LMJ.

© CEA

Calcul haute performance



Supercalculateur Tera 100.

Tera : super fort en maths

Issu du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA, Tera 100 est un supercalculateur « pétaflopique » français dédié à la Défense. Situé dans les locaux du centre de calcul de Bruyères-le-Châtel, il a été conçu en 2010 par la société Bull et le CEA-DAM. Il était alors le supercalculateur le plus puissant d'Europe. Sa mission : exécuter des simulations numériques complexes pour remplacer des expériences interdites (depuis la signature du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires), ou encore trop longues pour être réalisées en laboratoire. Pour cela, il traite des volumes de données hors du commun en un temps record ! Certains de ces résultats, comme ceux relatifs au fonctionnement d'une arme nucléaire, seront ensuite validés, notamment par des expériences réalisées sur le Laser Mégajoule.

Fortes de cette prouesse technologique et pour les besoins propres du CEA, les équipes de scientifiques préparent le changement d'échelle vers « l'exaftp » à l'horizon 2020,

avec des ordinateurs mille fois plus performants et les moins énergivores possible...

Le savoir-faire du CEA dans le domaine du calcul haute performance bénéficie également au tissu industriel français. Une diffusion de la démarche de simulation qui incombe au Centre de calcul recherche et technologie du CEA. Le CCRT aide en effet ses partenaires industriels et académiques à s'approprier les nouvelles technologies du calcul haute performance et à préparer celles de l'avenir dans divers domaines : nucléaire, santé, énergie, aéronautique, cosmétique, satellite, système radars... Les entreprises qui bénéficient de ce moteur d'innovation voient ainsi leur productivité et leur compétitivité s'améliorer en raison d'une diminution des coûts et des durées de développement de leurs produits. Et c'est tout l'objet du Plan Supercalculateur du gouvernement qui souhaite stimuler l'offre technologique nationale, comme Tera 100 a pu le faire.

Le supercalculateur Tera 100



Machine de calcul fonctionnant selon une architecture massivement parallèle : elle décompose les tâches à effectuer en milliers de sous-tâches. Chacune d'elles est ensuite réalisée, de manière simultanée, par un processeur (unité de calcul). En agrégeant un grand nombre de processeurs, ce procédé permet d'atteindre de grandes puissances de calcul.

Consommation et alimentation électrique

- 5 MW en régime de production.
- 25 km de câbles.

Système de calcul

- **Architecture** : 140 000 cœurs regroupés dans 17 000 processeurs multicœur qui équipent 4 370 serveurs Bullx interconnectés. Le tout est contenu dans 220 armoires informatiques.
- **Puissance de calcul** : 1,25 pétaflop de **puissance crête**, soit une capacité de calcul de plus d'un million de milliards d'opérations par seconde (10^{15}). Équivalent : calcul réalisé par la population mondiale en 48 heures, à raison d'une opération par seconde par personne.
- **Mémoire vive** : 300 téraoctets, soit la capacité de dizaines de milliers d'ordinateurs classiques.
- **Surface au sol occupée** : 600 m²

Refroidissement

- Système mixte eau glacée/air ; le système à eau refroidit les armoires de calcul, soit 80 % de toute la consommation de la machine. Il est installé dans la porte arrière des armoires informatiques :
 - 50 litres d'eau par minute par armoire ;
 - 40 kW dissipés par armoire ;
 - 1 km de tuyauteries installé dans les faux planchers ;
- Système de climatisation de la salle pour le complément.

Séquence de la simulation

- 1 Demande de calcul par l'utilisateur ;
- 2 Attribution d'une capacité de calcul, donc d'un nombre de processeurs avec de la mémoire, pendant un certain temps, selon les besoins et les disponibilités du supercalculateur ;
- 3 Réalisation des calculs par le système de calcul ;
- 4 Transition des résultats de calcul par le réseau de connexion vers le système de stockage ;
- 5 Récupération et visualisation de la simulation numérique par l'utilisateur.

Système de stockage

- Capacité : 20 Pétaoctets à l'aide de 11 000 disques. Équivalent : plus de 25 milliards de livres ;
- Durée du stockage : Indéfiniment pour la Défense ; 6 mois à 1 an pour les autres disciplines.

Débit de données

500 Go par seconde pour l'entrée et la sortie des données, qui ont lieu simultanément. Équivalent : capacité de transfert pour 1 million de personnes regardant en même temps un film en haute définition.

Réseau d'interconnexion

- Structure en « arbre » reliant de proche en proche les éléments de calcul et utilisant deux niveaux de **commutateurs**.
- Fonctions : assurer la communication ultrarapide entre les processeurs ; envoyer les informations traitées vers le système de stockage.

DÉFINITIONS

Puissance crête

Puissance théorique correspondant à l'addition de la puissance maximale de tous les processeurs de la machine. La puissance réellement mesurée sur une application étant la puissance dite « soutenue ».

Commutateur

Équipement qui relie plusieurs segments dans un réseau informatique.

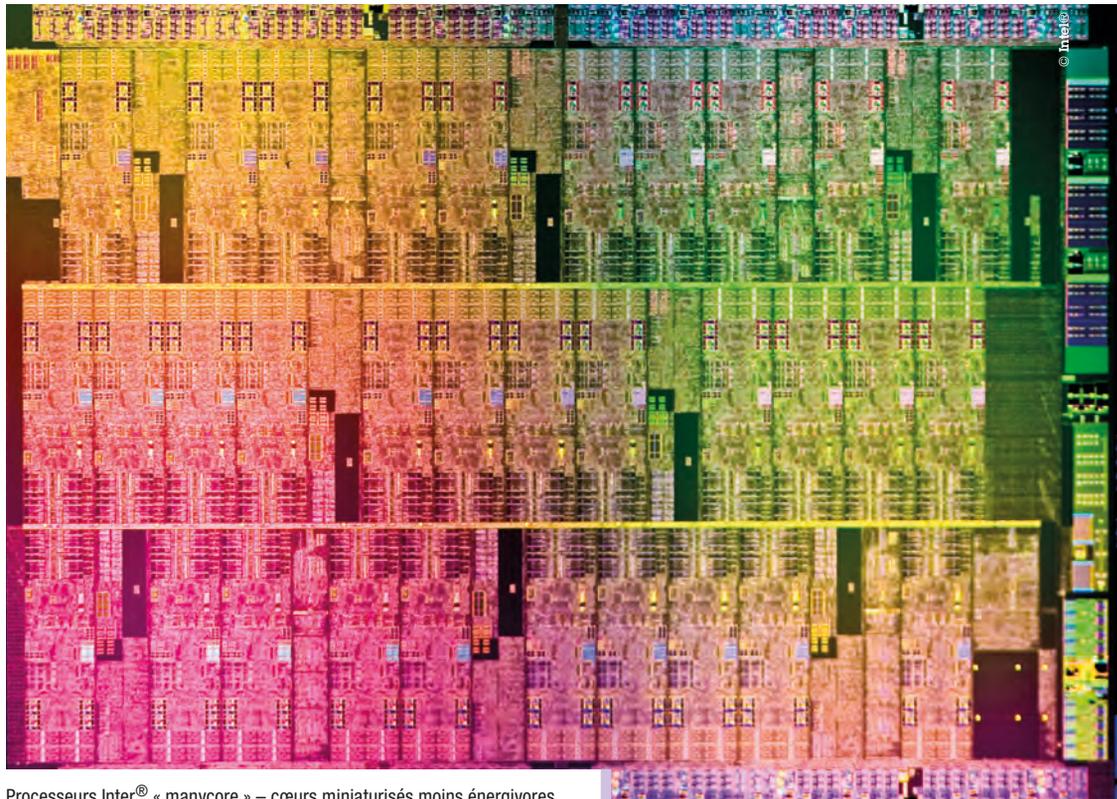
En route vers l'exascale...

En 2021, le supercalculateur de classe exaflopique EXA 1 réalisera un milliard de milliards (10^{18}) d'opérations par seconde. Il répondra ainsi aux exigences de précision et de rapidité de simulation des programmes armes nucléaires futurs.

Pour augmenter sa puissance de calcul et diminuer la consommation électrique, des évolutions majeures dans l'architecture d'EXA 1 seront nécessaires:

- Utilisation de systèmes de calcul à cœurs encore plus miniaturisés, cousins des composants actuels des consoles de jeux ou des smartphones, dits « basse consommation » ; mélange de différents types de processeurs ;
- Empilement vertical de certains composants, le « stacking 3D », pour réduire les distances et accroître les performances de connexion ;
- Utilisation accrue de mémoires « non volatiles », ou NVRAM, qui conservent les données en l'absence d'alimentation électrique ;
- Recours à la photonique (les photons remplacent les électrons) pour les connexions et communications ;
- Optimisation des performances des modèles physiques et mathématiques, des codes et des logiciels de simulation ;

Le tout en s'accommodant d'importantes contraintes de sécurité, de refroidissement et d'encombrement.



Processeurs Inter® « manycore » – cœurs miniaturisés moins énergivores.

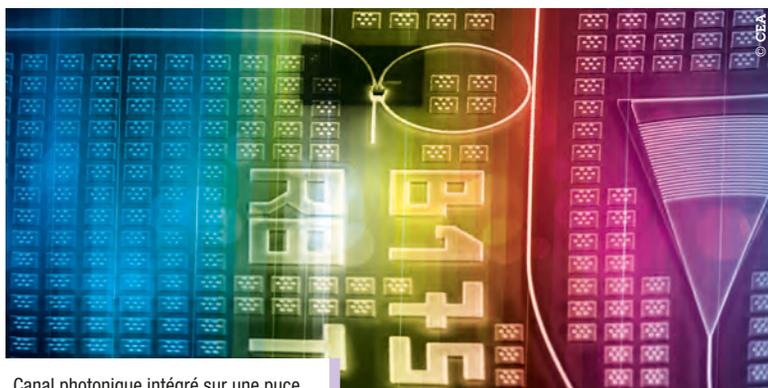
Avant de voir arriver EXA 1, les spécialistes du calcul du CEA passent par des étapes intermédiaires.

2015 : Tera 1000-1 dont la consommation électrique a été divisée par 5 par rapport à celle de Tera 100, avec une capacité de calcul similaire.

2017 : Tera 1000-2 avec une consommation identique à Tera 100 pour une puissance de calcul 20 fois plus

importante, et son architecture préfigurera celle d'EXA1.

Pour mener à bien ses programmes, le CEA s'appuie sur de nombreuses collaborations avec des partenaires industriels et académiques du domaine du calcul haute performance, à travers des projets nationaux et internationaux. Pour l'acquisition de Tera 1000, il s'est associé à la société ATOS.



Canal photonique intégré sur une puce.



UN PEU D'HISTOIRE

1963

Arrivée du calculateur IBM Stretch, ancêtre des « supercalculateurs », au CEA-DAM de Limeil.

Le calcul haute performance ouvert à l'industrie et à la recherche

Sur son site de Bruyères-le-Châtel, le CEA pilote le Centre de calcul recherche et technologie. Sa mission : soutenir l'innovation et promouvoir les partenariats industrie-recherche autour de la simulation numérique haute performance. Avec l'ensemble de ses supercalculateurs, le CCRT offre une puissance globale qui dépasse les 450 teraflops courant 2015. À ce service de calcul s'ajoutent la gestion de données, la visualisation à distance et le traitement de masses de données (*big data*) grâce à l'infrastructure mise en place récemment pour le consortium France-Génomique.

Les domaines traités par les partenaires sont variés : modélisation climatique, astrophysique, aéronautique, nucléaire, environnement, matériaux, génomique, cosmétique... En 10 ans, le CCRT a d'ailleurs vu le nombre de ses partenaires tripler. Aujourd'hui, ses ressources sont réparties entre le CEA, Areva, Cerfacs, Airbus D&S, EDF, l'Ineris, L'Oréal, Snecma, Techspace Aero, Turbomeca, Thales, Valeo.

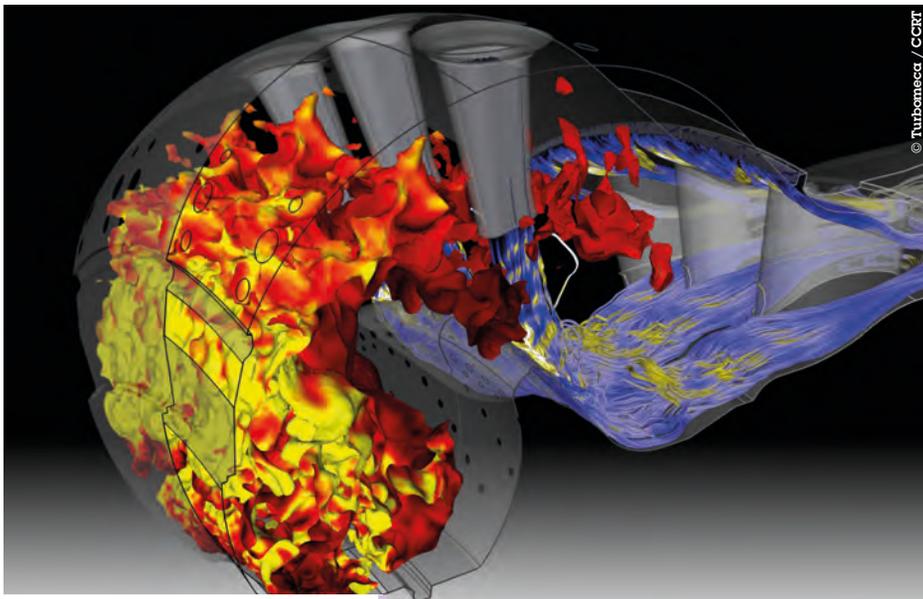
Pour aller toujours plus loin dans le développement des supercalculateurs et de leurs usages, le CEA participe à l'association Ter@tec qui vise à développer les compétences en

simulation numérique haute performance. Celle-ci réunit académiques et industriels cherchant à optimiser la combinaison de la simulation numérique et du calcul haute performance et développe un campus à proximité immédiate du site CEA de Bruyères-le-Châtel.

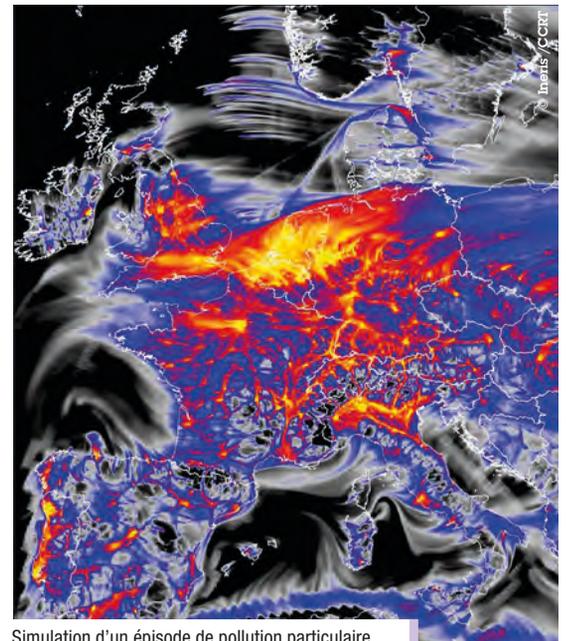
450

petaflops

PUISSANCE GLOBALE
DU CCRT EN 2015.



Simulation numérique de la combustion dans un foyer de turbomoteur d'hélicoptère.



Simulation d'un épisode de pollution particulaire

1982
Début de l'ère des calculateurs vectoriels du CEA-DAM.

1996
Dernier ordinateur vectoriel du CEA-DAM, Cray T90.

2001
Début de l'ère du calcul massivement parallèle, avec l'arrivée de TERA 1 qui franchit la barre du téraflop/s.

2003
Création du CCRT, ouverture du calcul haute performance aux industriels.

2005
Arrivée de TERA 10 (conçu par Bull), machine 12 fois plus puissante que TERA 1.

2010
Arrivée de TERA 100, fruit d'une collaboration CEA/Bull qui franchit la barre du pétaflop/s.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

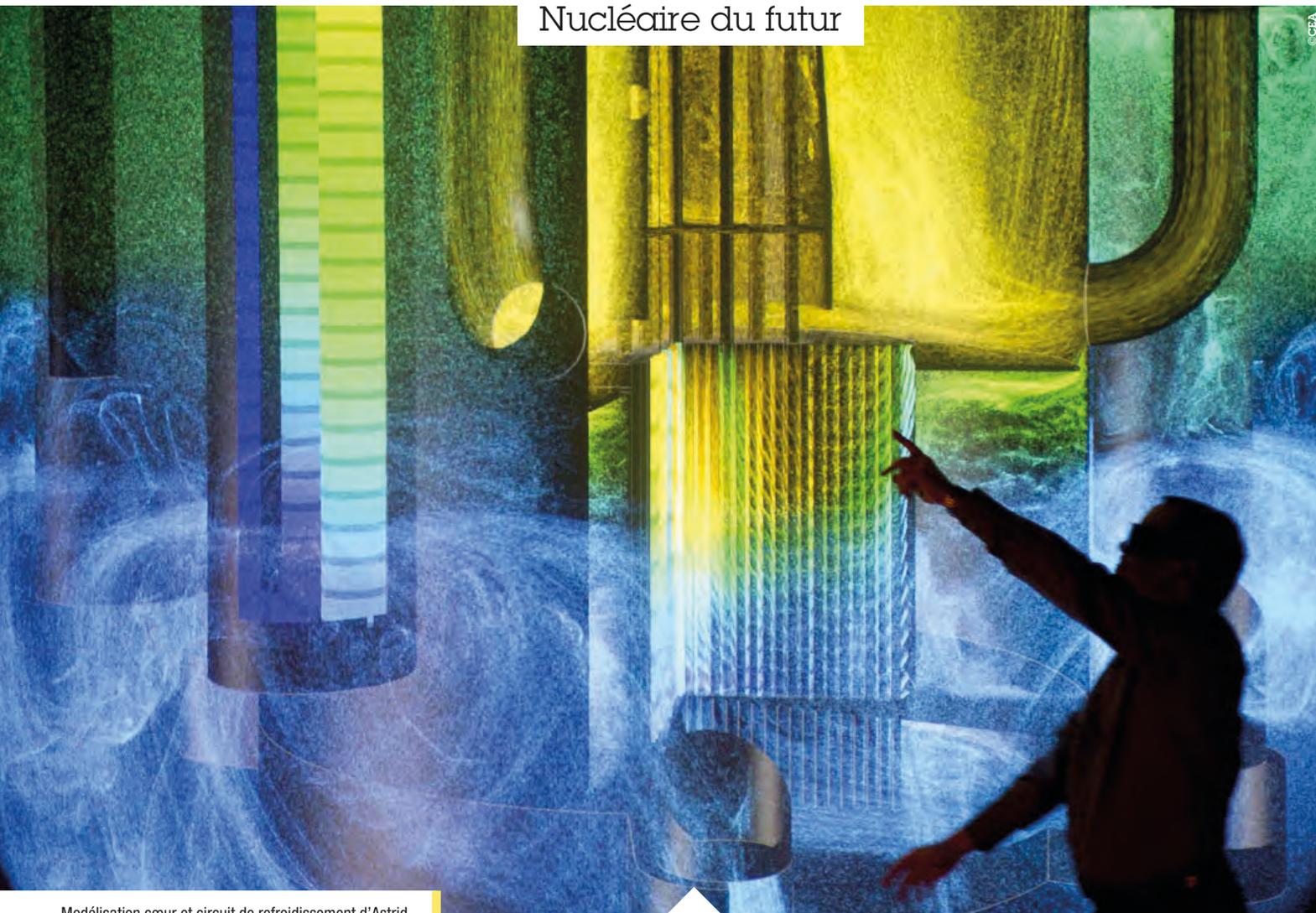
Besoin vital et facteur de croissance, la maîtrise de l'approvisionnement en énergie est un enjeu mondial.

L'industrie nucléaire dispose à cet égard de sérieux atouts. L'énergie nucléaire a ainsi un rôle incontournable à jouer, avec les énergies renouvelables, en tant que mode de production d'électricité non émetteur de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, les défis technico-économiques en termes de sûreté, durabilité des ressources et gestion des déchets imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation technologique. Ils requièrent le développement de systèmes innovants (réacteur et cycle du combustible associé), dits de 4^e génération.

Et demain, lorsqu'ITER sortira de terre, la faisabilité technique de la fusion nucléaire sera à l'étude.

Nucléaire du futur



Modélisation cœur et circuit de refroidissement d'Astrid.

1, 2, 3, 4, Astrid!

Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration, ou Astrid, est un projet de démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides, de quatrième génération, refroidi au sodium (RNR-Na), de 600 MWe. Piloté par le CEA à la demande du gouvernement français, ce projet est en phase d'étude jusqu'en 2019. Ses recherches bénéficient de l'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, tout en intégrant des choix d'options particulièrement avancées, notamment en termes de sûreté et d'opérabilité.

Astrid est un projet préparant le nucléaire du futur, dit de quatrième génération. Cette notion désigne les réacteurs dont les ruptures technologiques pourront satisfaire cinq grands critères : sûreté renforcée, durabilité (entre autres des ressources), minimisation des déchets, compétitivité, résistance à la prolifération. Des critères déterminés par les treize partenaires du Forum International Génération IV

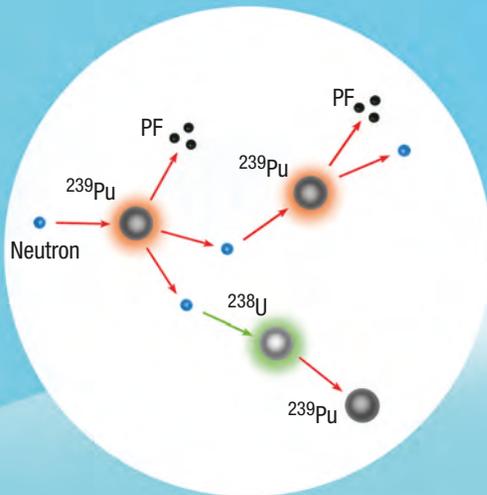
qui coordonnent les recherches en la matière. Pour y parvenir, ils ont identifié en 2002 six filières de réacteurs, dont trois sont intrinsèquement « à neutrons rapides ». Parmi elles, la technologie des RNR-Na constitue la filière de référence, avec une dimension internationale potentielle ainsi qu'une maturité qui pourrait être atteinte pour la seconde moitié de ce siècle en France, et probablement plus tôt dans d'autres pays.

Pour la mise en œuvre du projet, le CEA a reçu un soutien dans le cadre du programme gouvernemental Investissements d'Avenir et développe, en France et à l'étranger, plusieurs collaborations : des partenariats industriels sont conduits pour réaliser les études de conception et pour évaluer la faisabilité industrielle des composants innovants ; des partenariats de R&D visent la réalisation du programme de qualification de ces innovations. Ainsi, sur les 600 personnes impliquées dans le projet Astrid, plus de la moitié sont des personnels de ces partenaires.

Astrid



Projet de démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), de quatrième génération, doté des meilleurs standards de sûreté actuels.



Cœur à faible vidange

Pompe du circuit primaire

Échangeur du circuit secondaire

Barres de contrôle

Récupérateur de corium

Cuve en acier

Fonctionnement d'un RNR-Na

La réaction de fission nucléaire

Le combustible nucléaire d'un RNR-Na est un mélange d'environ 80 % d'uranium 238 (^{238}U) et 20 % de plutonium 239 (^{239}Pu).

Dans le cœur du réacteur, les neutrons fissionnent les atomes ^{239}Pu . Ces derniers – en plus de libérer de l'énergie et de la chaleur, et de générer des produits de fission (PF) – émettent d'autres neutrons qui cassent à leur tour d'autres atomes, et ainsi de suite (réaction en chaîne). Parallèlement, les atomes fertiles (non fissiles) ^{238}U capturent des neutrons et se transforment en ^{239}Pu (fissile). La consommation en ^{239}Pu est ainsi compensée par la production issue de ^{238}U .

Le système caloporteur

Alors que le fluide caloporteur des réacteurs actuels est de l'eau, celui des RNR-Na est du sodium qui présente l'avantage de rester liquide jusqu'à 900 °C.

Dans le cœur, une pompe pousse du sodium froid (400 °C) entre les assemblages de combustible pour récupérer l'énergie produite par les réactions de fission. En sortie du cœur, le sodium atteint 550 °C. Sa chaleur est extraite du circuit primaire par l'échangeur intermédiaire d'un deuxième circuit dans lequel circule également du sodium. Ainsi réchauffé, le sodium du circuit secondaire est dirigé vers un dispositif qui convertit sa chaleur pour actionner un turbo-générateur et produire de l'électricité.

Principales innovations de sûreté

1 Un cœur à réactivité maîtrisée

Un nouveau concept de cœur est développé pour en améliorer la sûreté en cas d'accident de perte globale de refroidissement. Il s'agit d'éviter l'ébullition du sodium grâce au concept dit de cœur à faible vidange (CFV). Celui-ci favorise la fuite des neutrons hors du cœur en cas d'accident pour ainsi réduire la réactivité du cœur en cas d'augmentation de la température du sodium.

2 Un récupérateur de corium

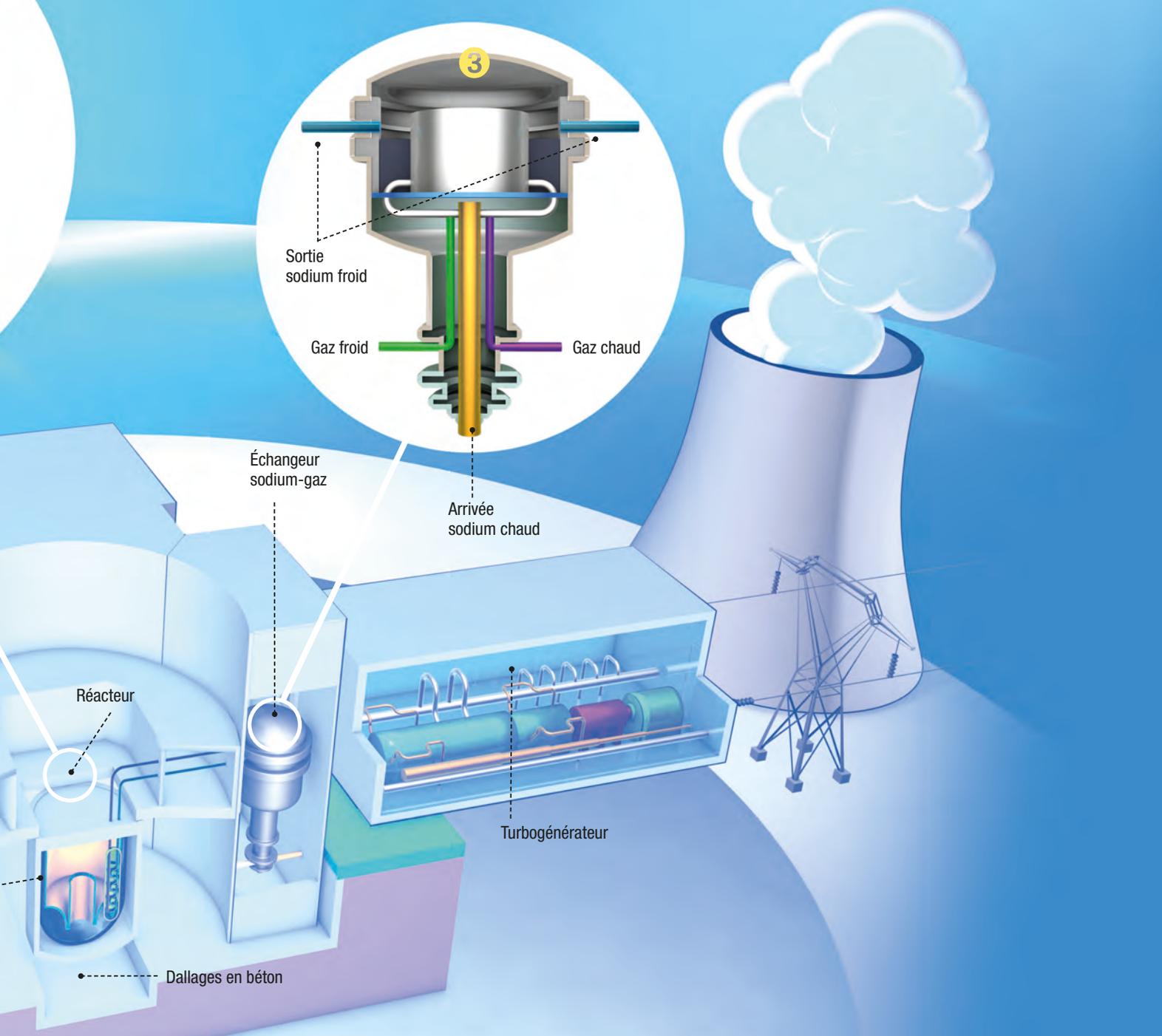
En cas de situation postulée de fusion du combustible et des gaines métalliques qui l'entourent, un magma très chaud se forme (+ de 2 000 °C), appelé corium. Une innovation consiste à le récupérer, grâce à un dispositif placé au fond de la cuve, pour l'étaler et le refroidir en empêchant la radioactivité de s'échapper dans l'environnement.

3 Un échangeur sodium-gaz

Le sodium étant réactif chimiquement avec l'eau, le générateur en eau-vapeur actionnant le turbogénérateur est remplacé par un système de conversion en gaz. Ainsi, la chaleur du sodium du circuit secondaire est communiquée à de l'azote qui, sous pression, se détend dans les turbines pour les faire tourner et produire l'électricité.

... Et aussi

Des dispositifs de détection précoce de micro-fuites de sodium sont développés ; tout comme des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle, même en cas de perte d'alimentation électrique ou de source d'eau froide. De même, des inspections et maintenances pourront avoir lieu pendant le fonctionnement du réacteur.





UN PEU D'HISTOIRE

2001

Lancement du forum international Génération IV, dont fait partie la France représentée par le CEA.

5 JANVIER 2006

Le CEA se voit confier, par le chef de l'État, la conception d'un prototype de réacteur de quatrième génération. Décision confirmée dans la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

2010

Début des études du projet Astrid.

L'intérêt des neutrons rapides

Dans un réacteur à eau pressurisée, les neutrons issus de la fission d'un noyau fissile sont ralentis par un modérateur. De « rapides » ils deviennent « thermiques » ce qui permet d'accroître leur probabilité d'interaction avec d'autres noyaux fissiles et optimise ainsi les réactions en chaîne. Mais cette modération a un inconvénient pour le plutonium 239 (formé à partir de l'uranium 238 du combustible) : il n'est qu'en partie fissionné car les réactions engendrent la formation d'isotopes supérieurs, dont certains (isotopes pairs) sont non fissiles sous flux de neutrons « thermiques ».

En revanche, les réacteurs à neutrons rapides ont une 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.

Le choix du sodium comme caloporteur

Le choix du sodium comme fluide caloporteur découle d'une analyse multicritère. Outre le fait qu'il ne ralentit pas les neutrons – condition essentielle pour les RNR –, le sodium liquide est doté de bonnes propriétés thermiques et d'une faible viscosité, ce qui en fait un excellent caloporteur. Il est faiblement activé par les neutrons et peu corrosif. En outre, il offre d'excellentes garanties en termes de sûreté, en particulier sa grande inertie thermique confère aux RNR-Na un excellent comportement en cas de perte de source froide externe.

Ses principaux inconvénients résident en son opacité et en sa forte réactivité chimique avec l'eau et l'oxygène de l'air. Ceux-ci sont toutefois suffisamment bien connus pour permettre de développer des parades efficaces.

Astrid, projet en partenariat

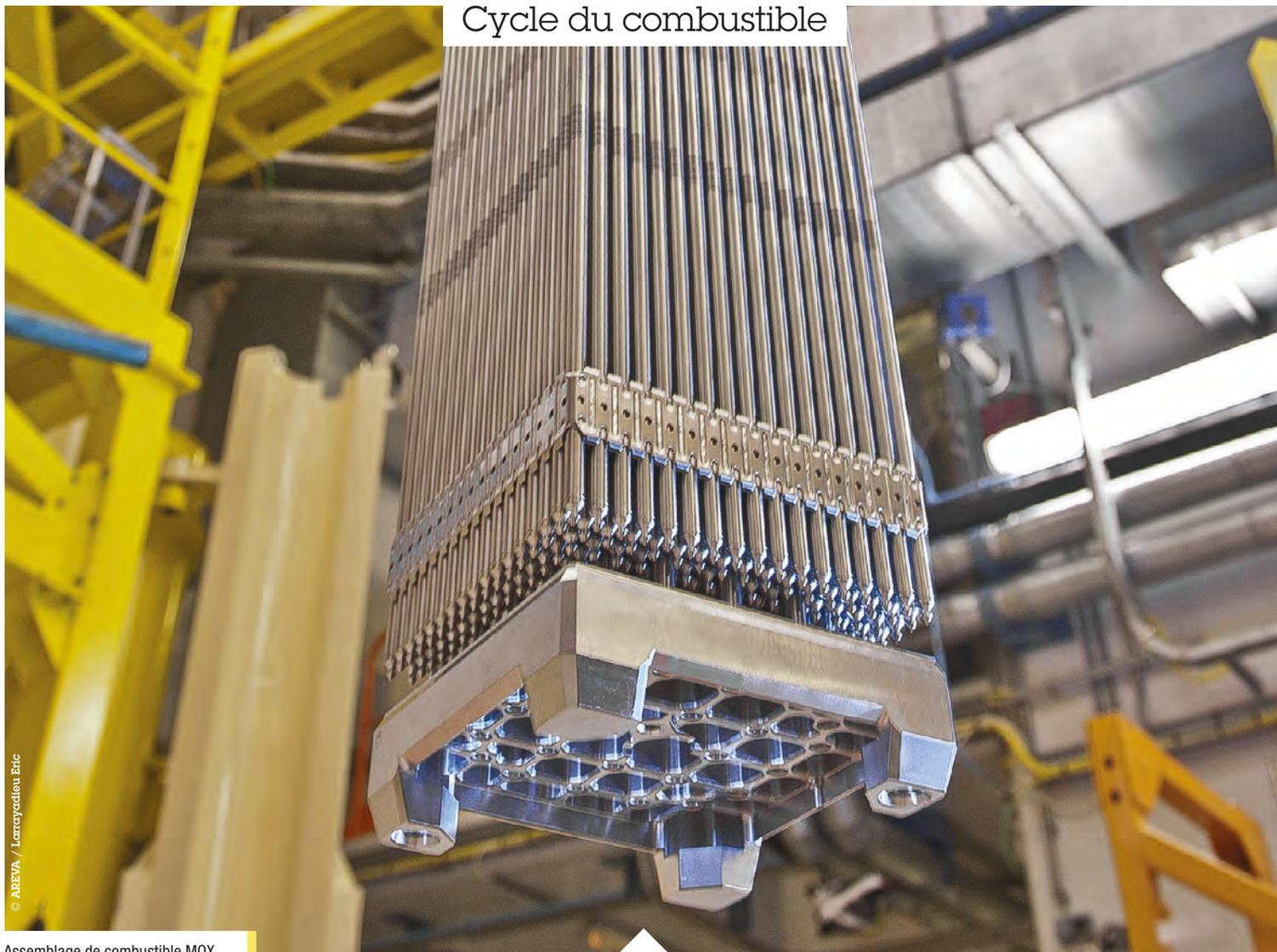
Pour ses études d'ingénierie, Astrid bénéficie de l'investissement d'industriels français et internationaux, sous la coordination du CEA, chargé également de la conception du cœur du réacteur.

- **Airbus Defence and Space** : fiabilité et sûreté de fonctionnement.
- **Alcen** : conception de la cellule d'examen des objets irradiés.
- **Alstom** : système de conversion d'énergie avec deux options (eau-vapeur ou gaz).
- **Areva NP** : îlot nucléaire, contrôle commande, auxiliaires nucléaires.
- **Bouygues** : génie civil, ventilation.
- **CNIM** : valorisation de la chaleur du système de conversion d'énergie au gaz.
- **Comex Nucléaire** : innovations en robotique et manutention.
- **EDF** : assistance à maîtrise d'ouvrage, retour d'expériences d'exploitation, contributions aux études de sûreté.
- **Jacobs France** : moyens communs et infrastructures.
- **JAEA, MHI et MFBR** : conception de systèmes de sûreté et contribution à la qualification.
- **Rolls-Royce** : échangeurs compacts sodium-gaz, manutention du combustible.
- **Technetics** : développement de solutions d'étanchéité pour les traversées de dalle et la robotique.
- **Toshiba** : pompes électromagnétiques de grande taille.
- **Velan** : conception et développement de vannes sodium d'isolement sur la boucle secondaire en sodium.



Étude de la stabilisation du sodium en sortie d'assemblage.

Cycle du combustible



© AREVA / Larracydieu Eric

Assemblage de combustible MOX.

Et la boucle serait bouclée

C'est dans une vision durable de l'énergie nucléaire que s'est bâtie, dans les années 1970, la stratégie française de traitement-recyclage des combustibles usés. L'enjeu étant d'apporter les meilleures réponses aux problématiques de disponibilité des ressources en uranium et de gestion des déchets ultimes. Cette stratégie repose sur le « cycle fermé ». À la différence d'un cycle ouvert, où le combustible usé est intégralement considéré comme un déchet, le cycle fermé consiste à extraire les matières valorisables (uranium et plutonium) du combustible usé pour les recycler dans de nouveaux combustibles. Seuls les produits de fission et les actinides mineurs constituent alors les déchets ultimes. Résultat : un volume de déchets moindre, à l'impact radioactif divisé par dix car le plutonium en a été retiré.

En amont de ce cycle, le CEA a contribué à bâtir toute la chaîne de préparation du combustible (extraction sélective,

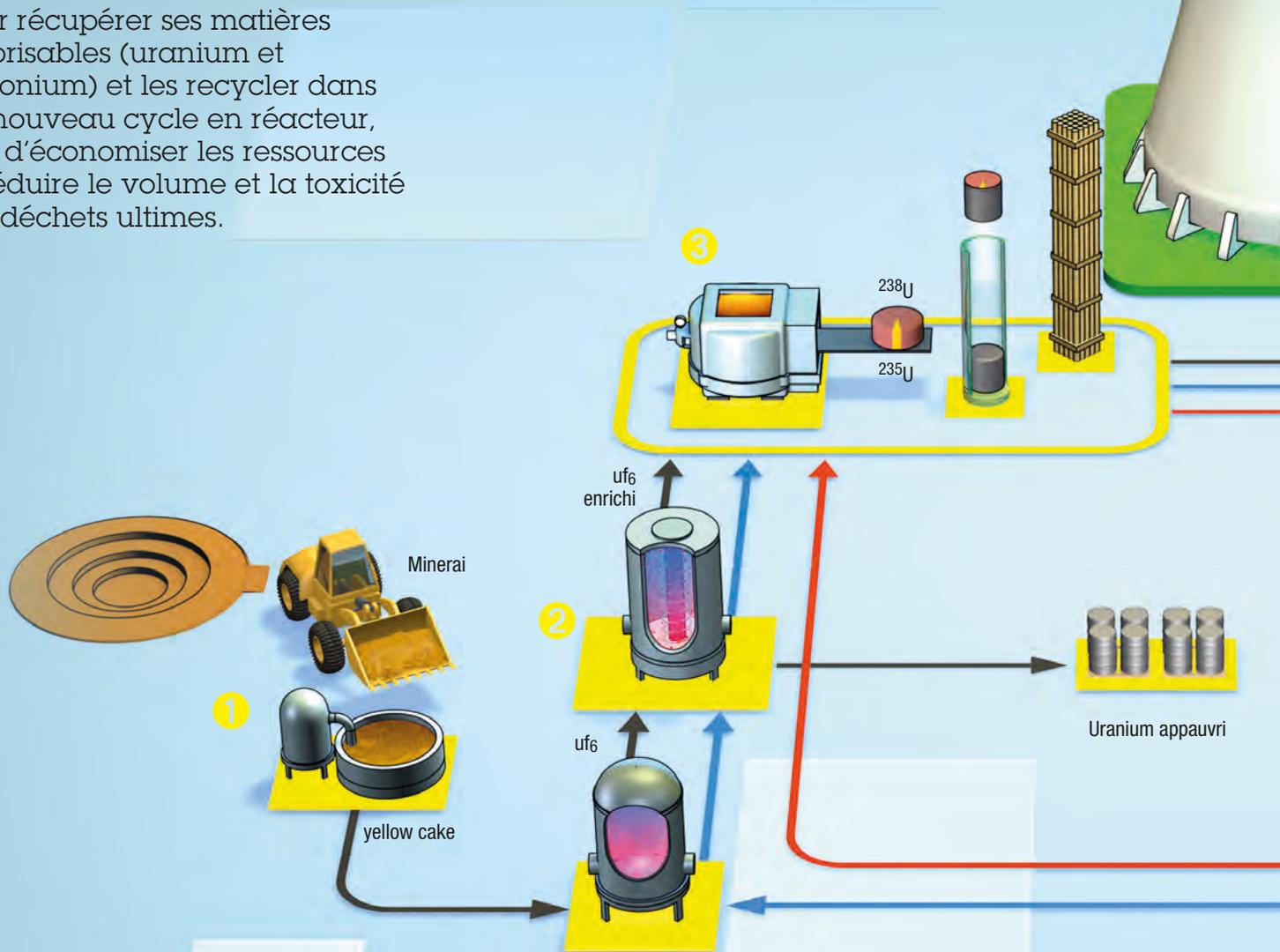
purification, enrichissement). Concernant l'aval, il est à l'origine de la majorité des procédés de traitement des combustibles usés, actuellement mis en œuvre par Areva dans son usine de La Hague. Une maîtrise des procédés relative à son activité historique : de 1946 à 1976, le CEA jouait à la fois le rôle d'opérateur de R&D et d'industriel, jusqu'à ce que le gouvernement décide de filialiser ses activités industrielles en créant la Cogema, devenue Areva-NC.

Aujourd'hui, le CEA poursuit ses recherches pour améliorer, compléter et adapter les technologies aux enjeux de demain ; en particulier, avec le développement des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération dans lesquels le cycle fermé trouvera sa pleine mesure. Ces derniers offriront notamment la possibilité de multirecycler (c'est-à-dire de façon répétée) le plutonium et l'uranium du combustible. Et, sur le plus long terme, ils permettront d'envisager le recyclage de certains actinides mineurs et ainsi la réduction de la durée de vie des déchets ultimes.

Les procédés du cycle fermé



Traiter le combustible utilisé pour récupérer ses matières valorisables (uranium et plutonium) et les recycler dans un nouveau cycle en réacteur, afin d'économiser les ressources et réduire le volume et la toxicité des déchets ultimes.



Amont du cycle

1 Extraction et conversion

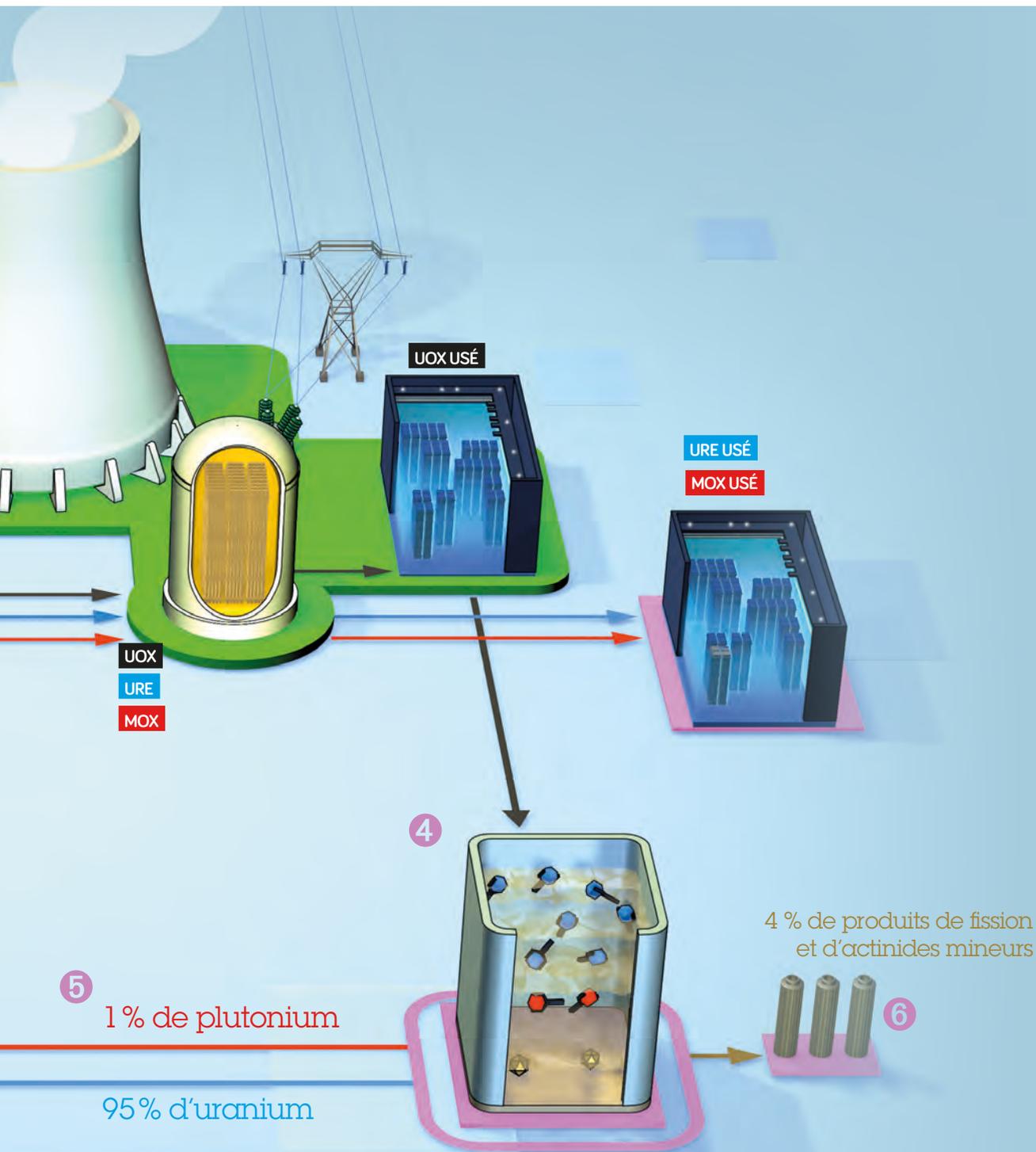
L'extraction du minerai uranifère, dans des gisements souterrains ou à ciel ouvert, fournit les ressources nécessaires à la fabrication du combustible. Contenant de 1 à 200 kg d'uranium par tonne, le minerai est dissous par voie alcaline ou acide, puis traité pour obtenir une poudre jaune, le *Yellowcake* (99,27% d' ^{238}U et 0,7% d' ^{235}U). Celui-ci est ensuite converti en un gaz : l'hexafluorure d'uranium (UF_6).

2 Enrichissement

Seul l'isotope ^{235}U de l'uranium est fissile (générateur de l'énergie lorsque son noyau est cassé par un neutron) ; or, il est présent en très faible proportion dans l'uranium naturel (0,7%). Grâce à l'enrichissement, par un procédé de centrifugation gazeuse, sa proportion augmente entre 3 et 5 %.

3 Fabrication du combustible

L' UF_6 gazeux est converti en poudre d'oxyde d'uranium (UO_2). Elle est comprimée en pastilles de 7 grammes qui sont empilées dans des tubes en alliage de zirconium, les « crayons ». Ces derniers sont réunis en faisceaux dans des assemblages de combustible qui sont chargés dans le réacteur pour produire de l'électricité. Par exemple, un réacteur à eau pressurisée (REP) de 900 MWe compte 157 assemblages de 264 crayons.



Aval du cycle

4 Séparation des éléments

Après environ quatre ans en réacteur, le combustible usé se compose de 96 % de matières valorisables et de 4 % de déchets ultimes. Ce combustible usé est entreposé en piscine de refroidissement puis subit plusieurs traitements avant d'être dissous dans une solution d'acide nitrique. Celle-ci est mélangée à une solution contenant des molécules extractantes spécifiques pour séparer les matières réutilisables des déchets ultimes.

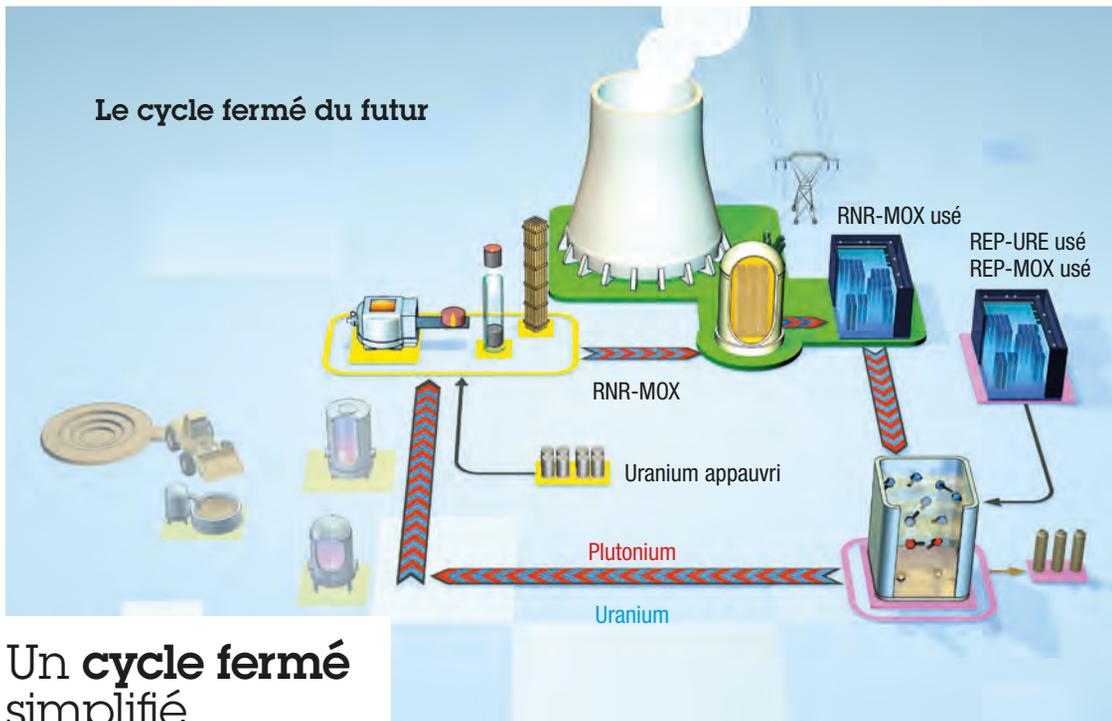
5 Recyclage des matières

Plutonium (1%) et uranium (95 % dont moins d'1 % d' ^{235}U) sont recyclés, respectivement en combustibles MOX (Oxyde mixte U et Pu) utilisés par 22 des 58 réacteurs actuels, et en URE (uranium de retraitement enrichi). Après un nouveau cycle en réacteur, ces combustibles ne peuvent pas encore être recyclés efficacement dans le parc actuel. Ils sont entreposés en piscine, en attendant leur valorisation dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de quatrième génération.

6 Conditionnement des déchets ultimes

Les déchets ultimes sont piégés dans une matrice de verre : c'est le procédé de vitrification, développé au CEA et mis en œuvre dans les usines d'Areva La Hague. Ces déchets vitrifiés sont ensuite coulés dans des conteneurs en inox et entreposés en puits, en attendant d'être stockés en couche géologique profonde.

Le cycle fermé du futur



Un cycle fermé simplifié

Le cycle fermé actuel permet de valoriser l'uranium (95 %) et le plutonium (1 %) du combustible utilisé dans des combustibles MOX. Mais les réacteurs à eau pressurisée (REP) ne peuvent pas encore recycler efficacement ce MOX usé.

C'est là qu'interviendront les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de quatrième génération, dont la capacité physique permet de fissionner efficacement l'ensemble des isotopes U et Pu. Ils permettront ainsi de recycler les REP-MOX et RNR-MOX usés, et d'utiliser l'uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement en amont du cycle. Cette perspective permettra d'aller encore plus loin dans la gestion durable des ressources et de simplifier considérablement le cycle puisque ses phases amont (extraction minière, conversion, enrichissement) ne seraient alors, à terme, plus nécessaires pour disposer de ressources fissiles.

Pour cela, les équipes du CEA-DEN travaillent, en partenariat avec les industriels de la filière, au développement des procédés avancés de recyclage, en lien avec le développement des RNR de 4^e génération.

Au-delà de la filière nucléaire, le recyclage des métaux stratégiques

Le savoir-faire scientifique et technologique unique du CEA sur les procédés de séparation et de recyclage se révèle pertinent pour relever de nouveaux défis. Notamment, celui hautement stratégique du recyclage des terres rares et autres métaux critiques. Dans cette perspective, le CEA a initié en 2014 l'Institut européen d'hydrométallurgie (IEH). Cette plateforme technologique permettra aux industriels de bénéficier des compétences du CEA en hydrométallurgie, chimie du recyclage et chimie verte ; et de tester et valider, sur des lignes pilotes, leurs propres procédés. Le CEA anime en parallèle le réseau européen Prometia visant à structurer la recherche européenne du domaine.



Extraction sélective d'uranium



UN PEU D'HISTOIRE

1958

Mise en service au CEA de Marcoule de l'usine UP1 de retraitement des combustibles usés.

1965

Mise en service de l'usine d'enrichissement de Pierrelatte au CEA.

1969

Première mondiale avec la mise au point du procédé de vitrification des déchets de haute activité au CEA.

1976

Création de la société COGEMA, filiale du CEA spécialisée sur les activités du cycle du combustible.

30 DÉCEMBRE 1991

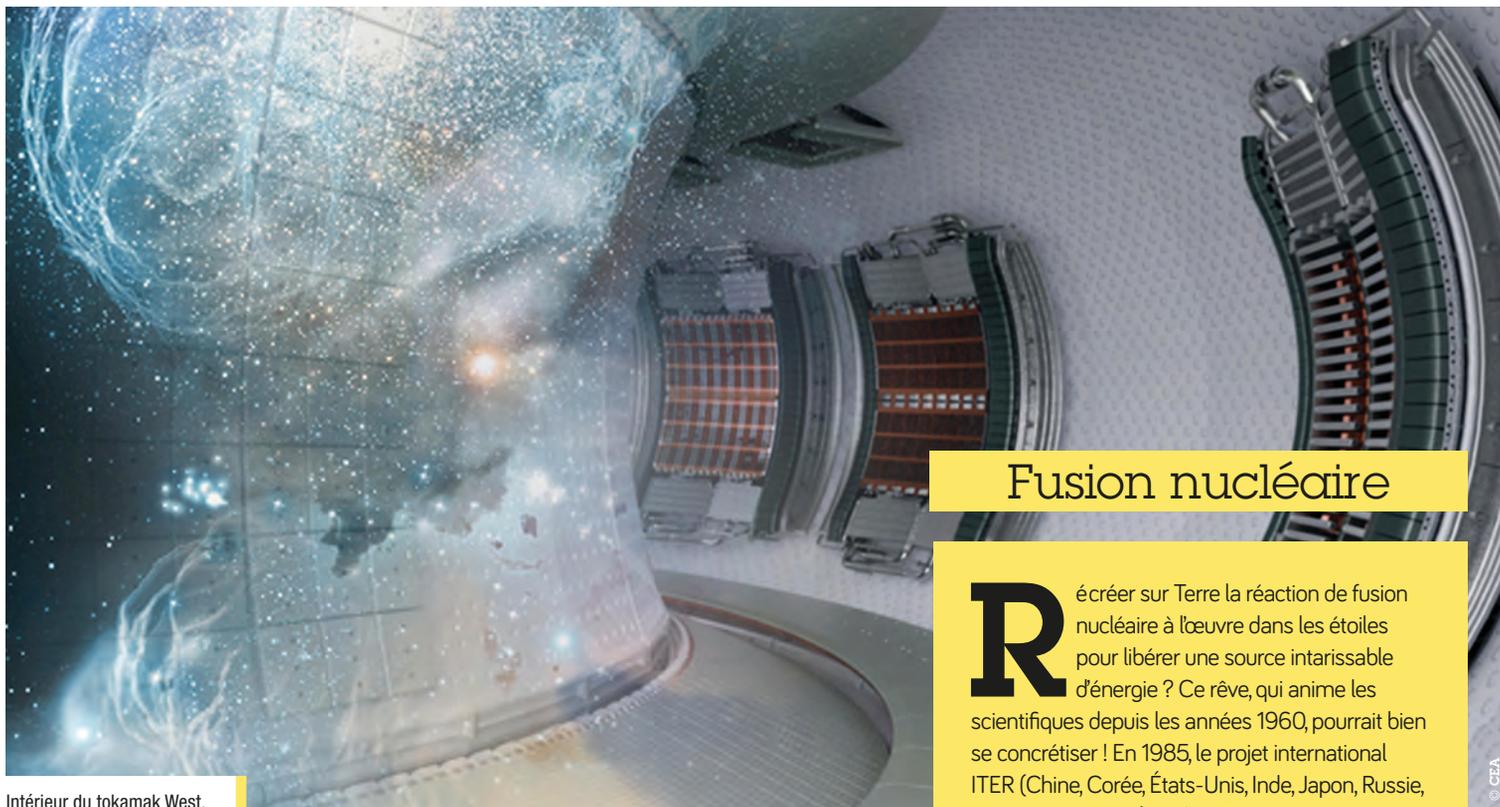
Loi relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs qui confie au CEA les recherches sur la séparation/transmutation et sur les procédés de conditionnement et d'entreposage.

1992

Mise en fonctionnement du laboratoire Atalante à Marcoule pour la R&D sur le cycle du combustible.

28 JUIN 2006

Loi relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. En lien avec les études sur les réacteurs à neutrons rapides, le CEA est l'acteur majeur des recherches sur le multirecyclage du plutonium et la séparation/transmutation des actinides mineurs.



Intérieur du tokamak West.

Fusion nucléaire

Récréer sur Terre la réaction de fusion nucléaire à l'œuvre dans les étoiles pour libérer une source intarissable d'énergie ? Ce rêve, qui anime les scientifiques depuis les années 1960, pourrait bien se concrétiser ! En 1985, le projet international ITER (Chine, Corée, États-Unis, Inde, Japon, Russie, Union européenne) est lancé pour réaliser le réacteur expérimental le plus puissant au monde. En construction depuis 2007 aux portes du centre CEA de Cadarache, il devra étudier la faisabilité technique de la fusion nucléaire.



ITER est un tokamak (chambre toroidale avec bobines magnétiques) du nom de la première « boîte » conçue par des chercheurs russes pour dompter un plasma. Précisément, un mélange de deutérium et de tritium porté à cent millions de degrés pour que les atomes fusionnent, générant beaucoup d'énergie. L'enjeu scientifique de la fusion nucléaire est de confiner et maintenir dans la durée ce plasma, grâce à la combinaison de champs magnétiques intenses (200 000 fois celui de la terre) et à des matériaux très résistants ! Les ruptures technologiques sont nombreuses. Le CEA contribue à les franchir, notamment avec son tokamak Tore Supra, opérationnel depuis 1988, qui détient le record du monde de durée avec un plasma de plus de six minutes. Ce tokamak se transforme en West, dans une configuration qui permettra de tester et de valider l'usage de dispositifs innovants pour ITER. En l'état : des composants en tungstène refroidis par circulation d'eau et exposés à des plasmas de longue durée...

Le Soleil mis en boîte



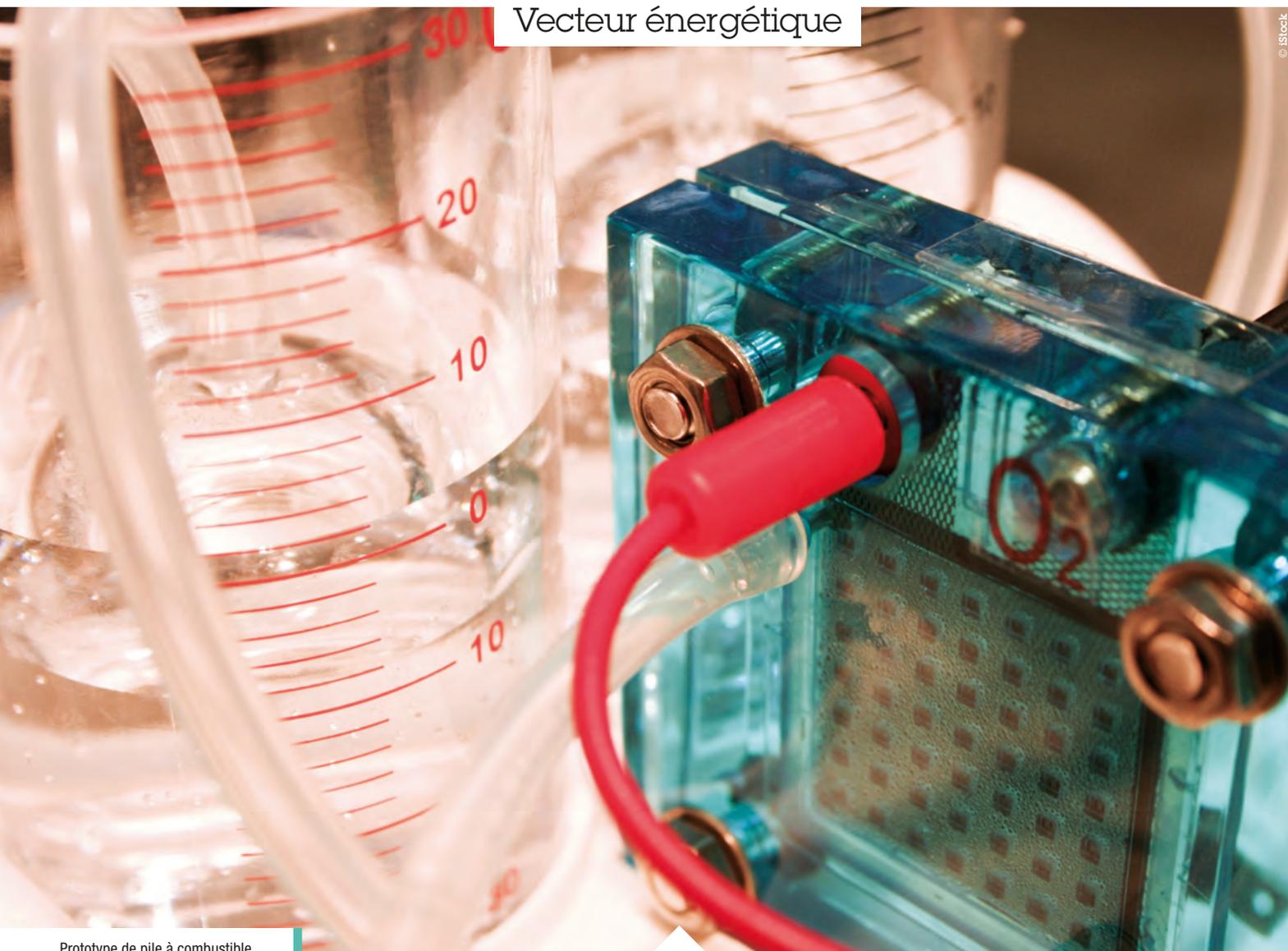
Chantier ITER en avril 2014.

ÉNERGIES ALTERNATIVES...

La France a promulgué la loi Transition énergétique pour la croissance verte. Enjeu : réduire d'un facteur quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Comment ? En diminuant la part des énergies fossiles, en augmentant celle des énergies alternatives, et en œuvrant à l'efficacité énergétique tant pour le transport que pour les bâtiments.

Ces objectifs sont au cœur des recherches du CEA qui propose des solutions technologiques innovantes, notamment pour le vecteur énergétique hydrogène, le stockage de l'énergie, et la gestion intelligente des réseaux qui devront désormais intégrer un nouveau mix énergétique.

Vecteur énergétique



Prototype de pile à combustible.

Hydrogène : atouts pour plaire

Accélérer l'essor des énergies renouvelables en palliant leur intermittence ; contribuer à la décentralisation de la production d'électricité tout en équilibrant l'offre et la demande ; ou encore participer au déploiement de la mobilité durable. À n'en pas douter l'hydrogène est un allié essentiel de la transition énergétique qui se joue actuellement. Produit majoritairement à partir d'hydrocarbures, ou d'électricité décarbonnée, le précieux gaz est un vecteur énergétique multi-usages. Il permet l'injection d'électricité supplémentaire dans le réseau (*power to power*), la prolongation d'autonomie pour les véhicules électriques (*power to mobility*), la fabrication de méthane (*power to gas*)...

Autant d'atouts identifiés par le CEA, dont les équipes du CEA-Liten et du CEA-DAM se positionnent à tous les niveaux des développements : électrolyseur pour la production d'hydrogène, réservoir pour son stockage, pile à combustible

pour sa restitution en électricité, réacteur de méthanation... Et ce, grâce à des innovations sur des matériaux et composants plus résistants, des technologies toujours plus performantes, durables, sûres et respectant l'environnement. Pour cela, il s'appuie sur les compétences de ses chercheurs en matériaux, procédés haute température et haute pression, et intégration de systèmes. De plus, il dispose d'installations techniques de pointe telles que les plateformes Hydrogène, Pile à combustible et Nanocaractérisation à Grenoble, la plateforme Lavoisier à Tours, toutes à disposition de ses nombreux partenaires industriels. Car l'enjeu de sa recherche est bien de transférer des technologies au stade préindustriel, en vue de leur production de masse. Dans ce cadre, il peut également compter sur ses experts en technico-économie pour valider la rentabilité et l'adéquation de ses technologies avec les besoins du marché. Le CEA est ainsi un acteur essentiel au développement de la filière hydrogène, comme l'atteste son appartenance à l'association Afhyac.

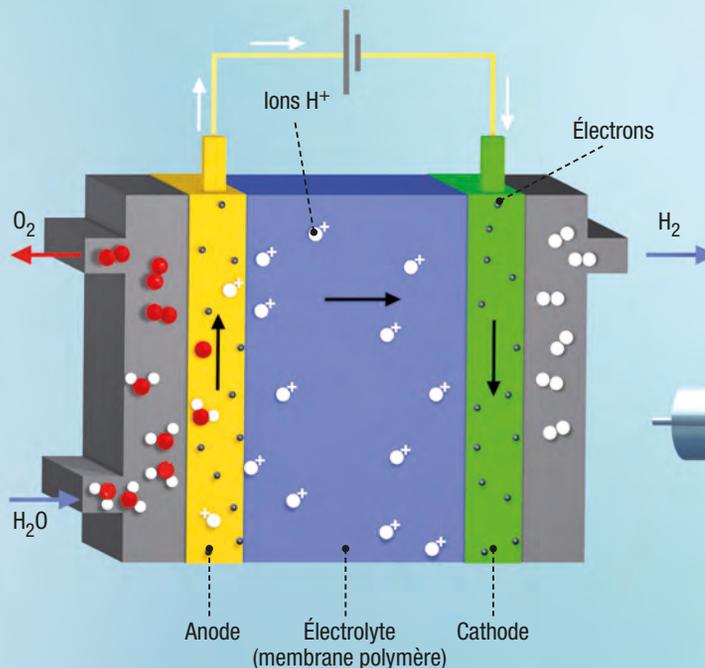
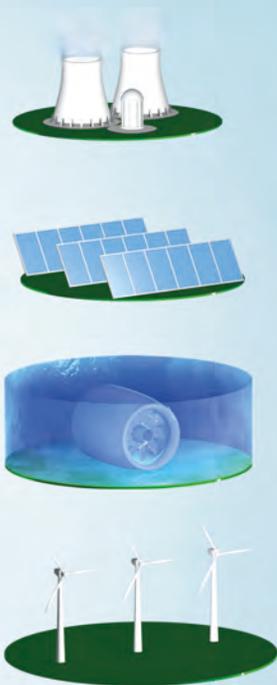
Le vecteur hydrogène



Un des moyens de production de l'hydrogène à partir d'énergie nucléaire ou renouvelable est l'électrolyse. Une fois le gaz produit, il peut être directement utilisé ou bien stocké et converti de nouveau en électricité, par une pile à combustible, pour de multiples usages. Exemple avec l'électrolyse basse température à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) et la pile à combustible PEM.

Usages directs

Injection dans le réseau de gaz naturel.



Source d'électricité

Renouvelables (solaire, éolien, hydraulique ou énergies marines) ou nucléaire, plusieurs sources d'électricité peuvent être utilisées pour une production décarbonée d'hydrogène. Pour cela, le courant issu d'une centrale est injecté dans un électrolyseur.

Électrolyse : de l'électricité à l'hydrogène

Dans un électrolyseur basse température PEM, le courant continu qui traverse les cellules permet de décomposer les molécules d'eau (H_2O) en ions hydrogène (H^+) et oxygène (O^{2-}).
 $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$: à l'anode, où se déroule l'oxydation de l'eau, du dioxygène est produit sous l'effet du courant ainsi que des ions H^+ qui traversent ensuite la membrane électrolyte.

$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$: à la cathode les ions H^+ se recombinaient et forment du dihydrogène H_2 qui peut ainsi être récupéré.

Stockage

L'hydrogène produit est conditionné dans un réservoir selon différentes technologies fonction des applications (stationnaires ou embarquées). Parmi elles, le stockage gazeux sous pression (de quelques bars à 700 bars) et le stockage solide où l'hydrogène est absorbé par des matériaux métalliques placés dans le réservoir. La désorption de l'hydrogène des hydrures se fait ensuite par un apport de chaleur.

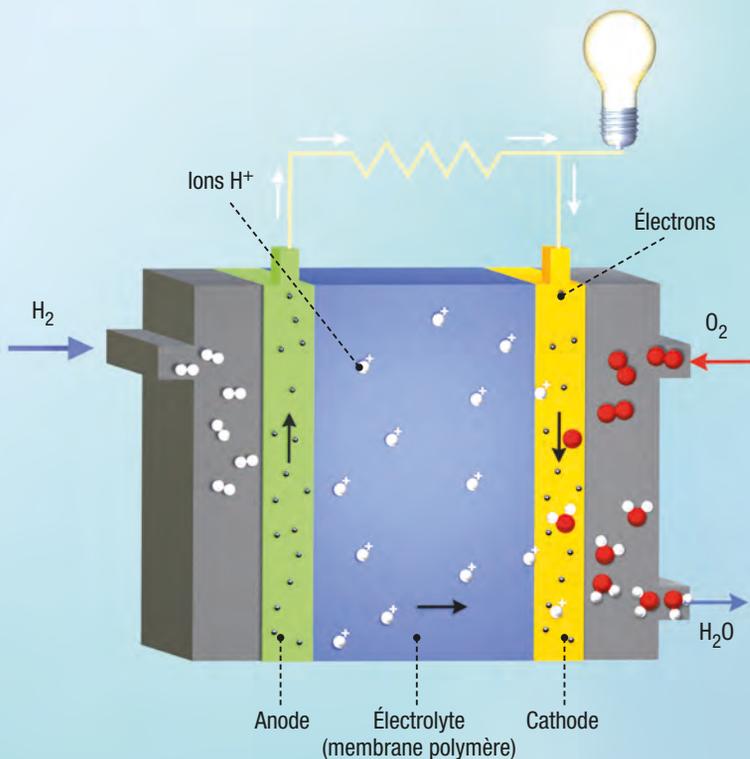


Combinaison avec du CO₂ industriel pour le revaloriser en formant du méthane et des biocarburants (*power to hydrocarbure*). $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

À SAVOIR



La pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse. L'anode est l'électrode où a toujours lieu « l'oxydation » (réaction dans laquelle un atome ou un ion perd des électrons). La cathode est toujours le siège de la « réduction » (réaction dans laquelle un atome ou un ion gagne des électrons).



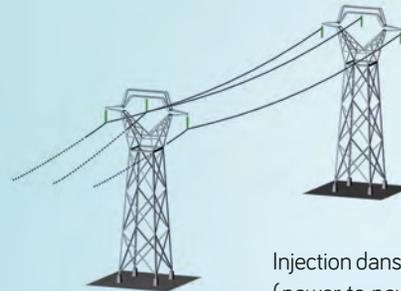
Conversion : de l'hydrogène à l'électricité

Dans une pile à combustible basse température à membrane échangeuse de protons, il se produit la réaction inverse de l'électrolyse PEM.

$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$: l'hydrogène stocké est injecté à l'anode de la pile à combustible. Là, les molécules H₂ se dissocient en ions H⁺ qui migrent vers l'électrolyte et en électrons qui sont contraints de circuler dans un circuit qui génère un courant et donc de l'électricité.

$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$: à la cathode, ces électrons se recombinaient avec les ions H⁺ et les molécules O₂ (issues de l'air ambiant) pour former de l'eau H₂O, unique « déchet » de cette réaction qui produit également de la chaleur.

Usages indirects



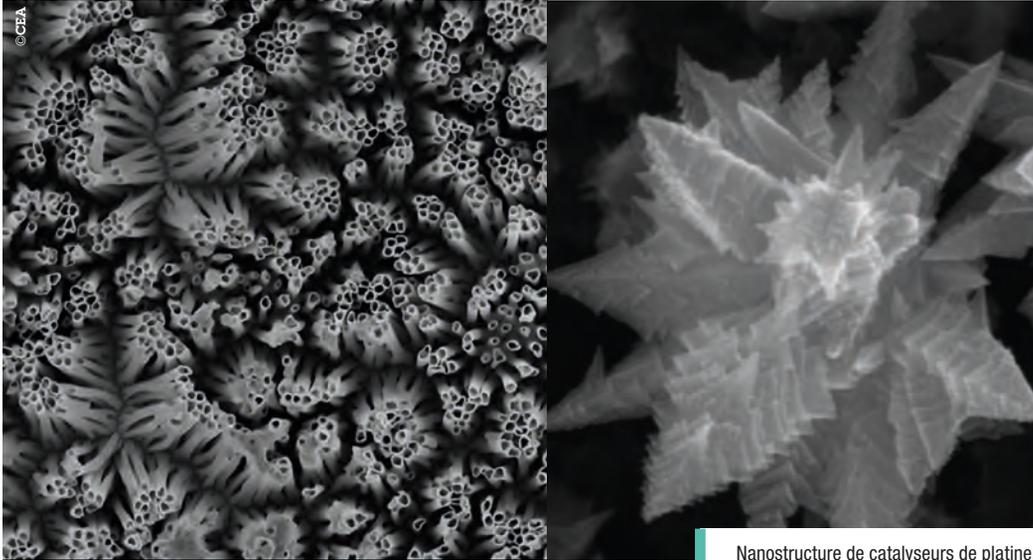
Injection dans le réseau électrique (*power to power*).



Utilisation pour la mobilité électrique (*power to mobility*).



Production de chaleur par cogénération.



Nanostructure de catalyseurs de platine.

Le CEA voit toujours plus loin

Pour diminuer le coût des piles à combustible, le CEA cherche à réduire, voire substituer, le platine utilisé comme catalyseur. Ce métal est en effet trop cher et trop rare à la surface de la Terre pour satisfaire des besoins massifs. A travers le projet Rosace, les scientifiques développent des matériaux alternatifs basés soit sur les nanotubes de carbone (CEA-Iramis), soit sur le graphène (CEA-Inac). D'autres pistes privilégient l'utilisation du nickel ou du fer en s'inspirant de processus chimiques à l'œuvre dans les organismes vivants, comme les systèmes enzymatiques appelés hydrogénases (CEA-IRTSV).

Par ailleurs, le CEA-Liten et le CEA-DAM développent actuellement un système de stockage hybride haute pression / hydrure.

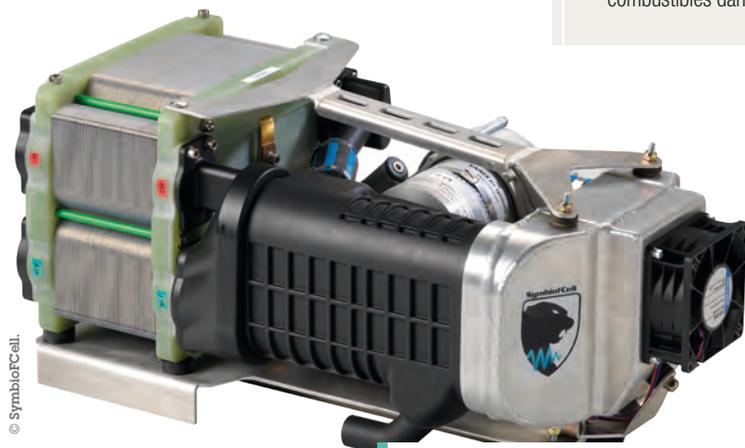
Concernant l'électrolyse, un électrolyseur haute température de rendement atteignant 99% a vu le jour en 2014. Baptisé Sydney, il a la particularité d'être réversible. Une avancée aux nombreuses applications.



Réservoir de stockage hydrure.

De nombreux démonstrateurs industriels

- Pile à combustible Genepac (PSA Peugeot Citroën - 2006)
- Véhicule 307cc FISYPAC intégrant une pile Genepac (PSA Peugeot Citroën - 2009)
- Réservoir de stockage hydrure (McpHy Energy- 2010-2011)
- Plateforme Myrte (Université de Corse et Hélon - 2012)
- Véhicules HyKangoo du projet HyWay intégrant une PAC développée par le CEA (SymbioFCcell - 2014)



Pile à combustible développée par le CEA et commercialisée par SymbioFCcell.



UN PEU D'HISTOIRE

DÉBUT DES ANNÉES 1990

Démarrage de l'activité hydrogène, essentiellement sur le développement de membranes et de catalyseurs pour la Défense et le civil.



1993

Lancement du programme Véhicule propre et économe qui comprend un axe pile à combustible.



1999

Animation conjointe CEA et Ademe du réseau national de recherche technologique « pile à combustible »



1999

Responsabilité du programme Nouvelles technologies pour l'énergie.



1999

Développement des premiers réservoirs de stockage d'hydrogène à 700 bars



2000

Début du développement des piles à combustibles dans le transport.

Stockage d'énergie



Composants d'une batterie lithium-ion.

Une batterie d'autonomie

Qu'elle contienne du plomb, du nickel ou du lithium, la batterie désigne l'assemblage d'accumulateurs permettant de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique.

Depuis des années, CEA Tech développe ces dispositifs pour diverses applications : transports (terrestres, aériens ou marins), appareils nomades (y compris les implants médicaux), stockage des énergies renouvelables. Il concentre plus particulièrement ses efforts sur les accumulateurs lithium-ion (Li-ion) mais prépare déjà les technologies de demain.

La technologie Li-ion offre actuellement les meilleures performances dans des produits commerciaux : environ 500 - 700 Wh/L et 180 - 270 Wh/kg pour une tension nominale d'environ 3,6-3,7 V, et dans une large gamme de température de fonctionnement (- 20 à + 60 °C), pour une durée de vie en cyclage correspondant à quelques centaines de cycles. Ces batteries alimentent d'ailleurs

la plupart de nos objets du quotidien. Toutefois, pour les améliorer, le CEA-Liten développe de nouveaux matériaux, optimise la conception, ou encore réalise des prototypes de démonstration répondant aux besoins concrets d'un utilisateur (taille, puissance...). Pour passer de la preuve de concept en laboratoire à ces démonstrateurs, les équipes disposent d'une recherche de pointe et de plateformes technologiques uniques en Europe. Et ces moyens sont ouverts aux industriels intéressés par la R&D de toute la filière batteries. À la clé, apporter de l'innovation dans l'industrie, pour la mobilité électrique, et certains marchés précurseurs comme le médical et le spatial.

Dans un souci de respect de l'environnement et de durabilité, le CEA aborde ses développements avec une approche d'« économie circulaire » : dès la conception, il favorise les procédés et équipements à faible consommation énergétique, et prévoit le traitement et recyclage des éléments valorisables en fin de vie de la batterie...

Les batteries



La batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stocke l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes, et des électrons dans un circuit extérieur. Différentes batteries existent selon leurs applications et leurs fonctions. Présentation d'une batterie lithium-ion.

DÉFINITIONS



Accumulateur

Système électrochimique accumulant l'énergie électrique sous forme chimique et la restituant sous forme électrique. Il est réversible, c'est à dire rechargeable, contrairement à une pile.

Ion

Atome ayant gagné ou perdu un électron (particule neutre), qui porte une charge électrique positive ou négative.

Électrode

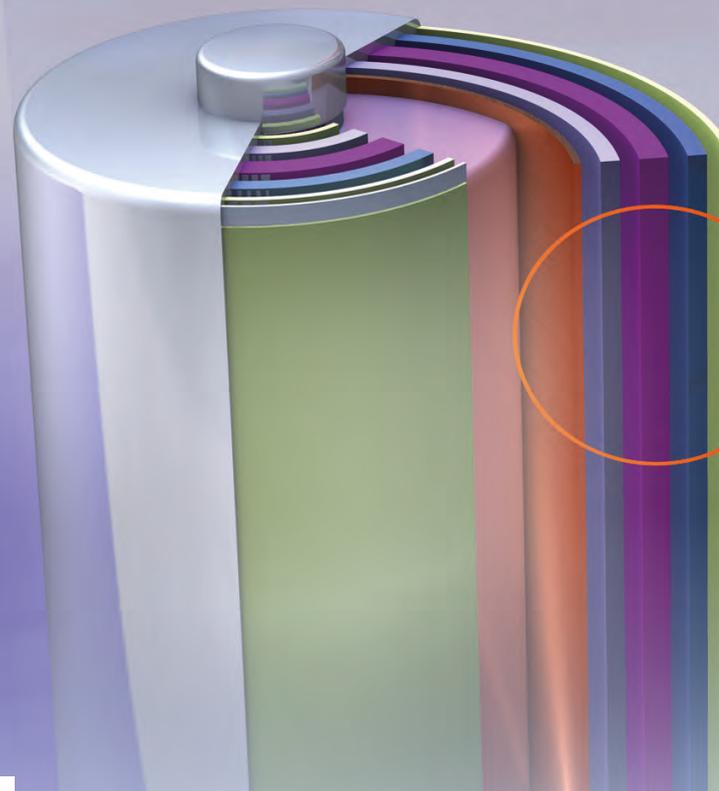
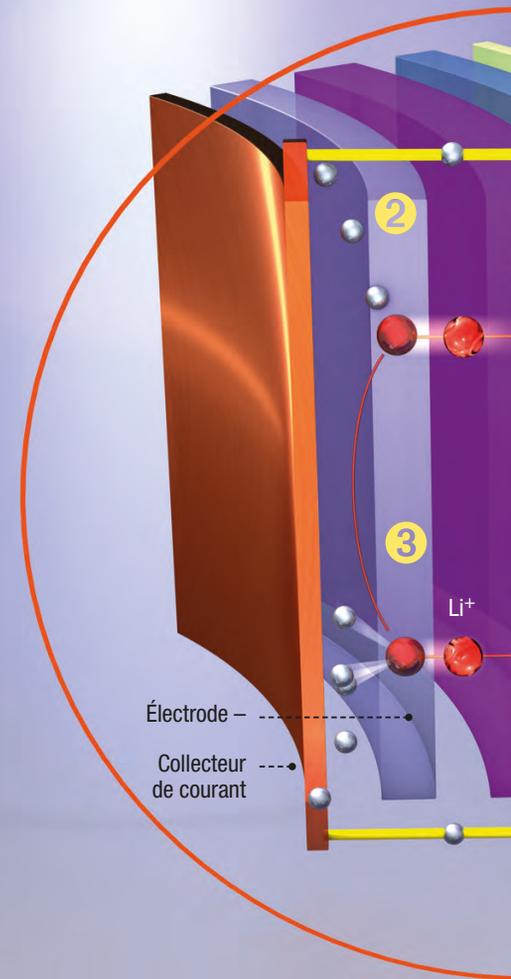
Composant à base de matériaux actifs permettant l'insertion et la désinsertion d'ions au pôle positif et négatif d'un générateur électrique.

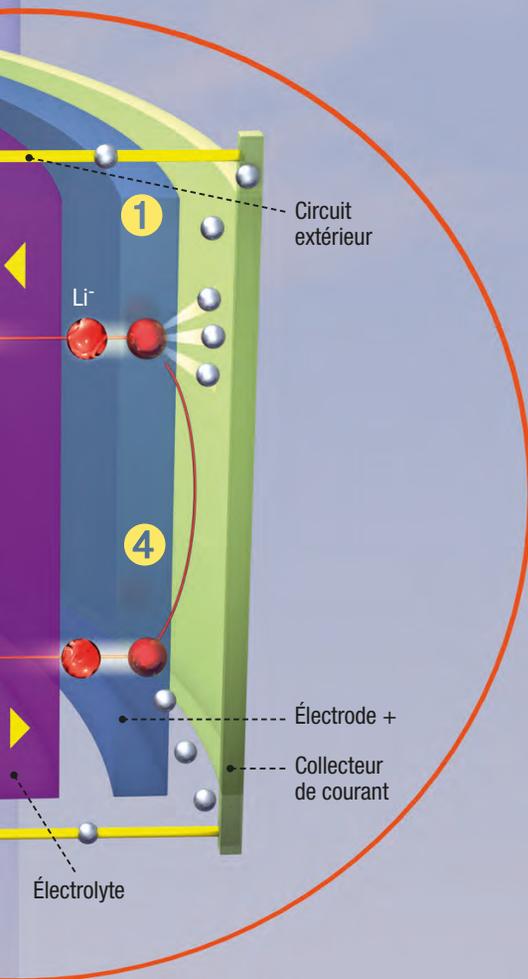
Électrolyte

mélange liquide, gel ou solide qui permet le passage des ions entre les électrodes.

Réaction d'oxydo-réduction

Réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est un « oxydant » ; celle qui les cède est un « réducteur ».





Fonctionnement de l'accumulateur

En charge

Réaction d'oxydation dans l'**électrode +** qui libère des **ions** lithium Li^+ dans l'**électrolyte** et renvoie des électrons vers le circuit extérieur **1**

Réaction de réduction dans l'électrode - qui intègre des ions Li^+ en consommant les électrons fournis par le circuit extérieur **2**

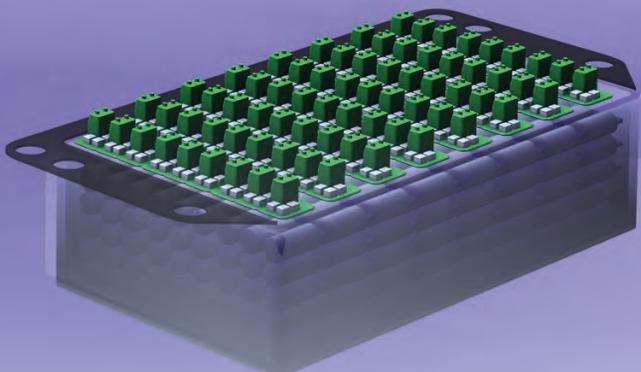
En décharge

Réactions inverses aux électrodes : libération des ions Li^+ par l'électrode - **3** et réinsertion dans l'électrode + **4**. Ce principe de fonctionnement est appelé : mécanisme rocking-chair.

Réalisation du pack batterie

Assemblage des **accumulateurs** dans des modules montés en série et en parallèle pour atteindre la tension de fonctionnement et l'énergie (kWh) nécessaires au véhicule.

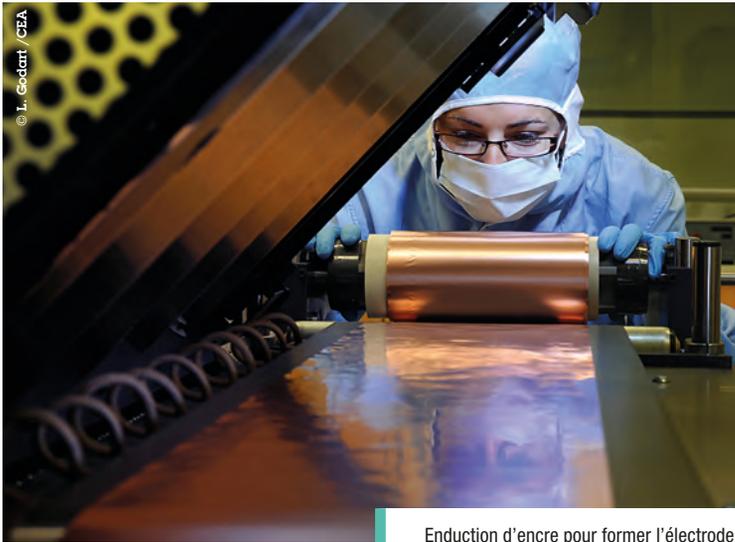
Gestion électronique dans les modules pour contrôler la charge et la décharge des accumulateurs et ainsi garantir la sécurité et la performance des batteries.



Recharge de la batterie

Source extérieure d'énergie issue d'une borne reliée au réseau électrique pouvant être alimentée par des énergies renouvelables.





Enduction d'encre pour former l'électrode.



Inspection d'un bobineau



Connexion des modules batterie

La relève des batteries Li-ion est assurée !

Alors que les batteries Li-ion présentent aujourd'hui les meilleures performances en termes de durée de vie et d'autonomie, des systèmes Li-Soufre sont en cours de développement au CEA pour améliorer ces performances. À masse équivalente, ces batteries présentent une autonomie trois fois plus importante et sont envisagées pour des applications nécessitant beaucoup d'énergie dans une masse réduite : véhicules électriques, aéronautique, spatial...

Pour optimiser la durée de vie de ces batteries, les chercheurs utilisent la propriété de solubilité du Li-S pour le placer directement dans l'électrolyte. L'électrode positive est alors liquide, on parle de « catholyte ». Ils ont également augmenté la surface active du collecteur de courant de cette catholyte, par exemple en déposant des tapis de nanotubes de carbone sur un feuillard d'aluminium.

Le CEA à tous les niveaux de développement

Le CEA dispose de plateformes technologiques de premier rang conçues avec et pour les industriels afin de positionner ses développements sur l'ensemble de la chaîne : fabrication de cellules, assemblage de modules et de packs de batteries, intégration système... Des batteries à toutes les échelles peuvent alors être fabriquées selon les applications : étiquettes intelligentes, médicales, spatiales, aéronautiques, solaires et mobilité électrique...



UN PEU D'HISTOIRE

DÉBUT ANNÉES 2000

Dépôt de brevets pour les batteries lithium-fer phosphate (LFP).

2003

Création du CEA-Liten, Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles.

2012

Commercialisation d'une technologie LFP du CEA par Prayon et Umicore, sous le label BeLife.

2013

Commercialisation de la technologie CEA de batteries utilisant du silicium à l'électrode négative dans les montres Breitling pour alimenter une balise de détresse.

2015

Conception et assemblage du pack batterie de l'eFan d'Airbus avec Airbus Defence and Space pour la traversée de la Manche.

© DR



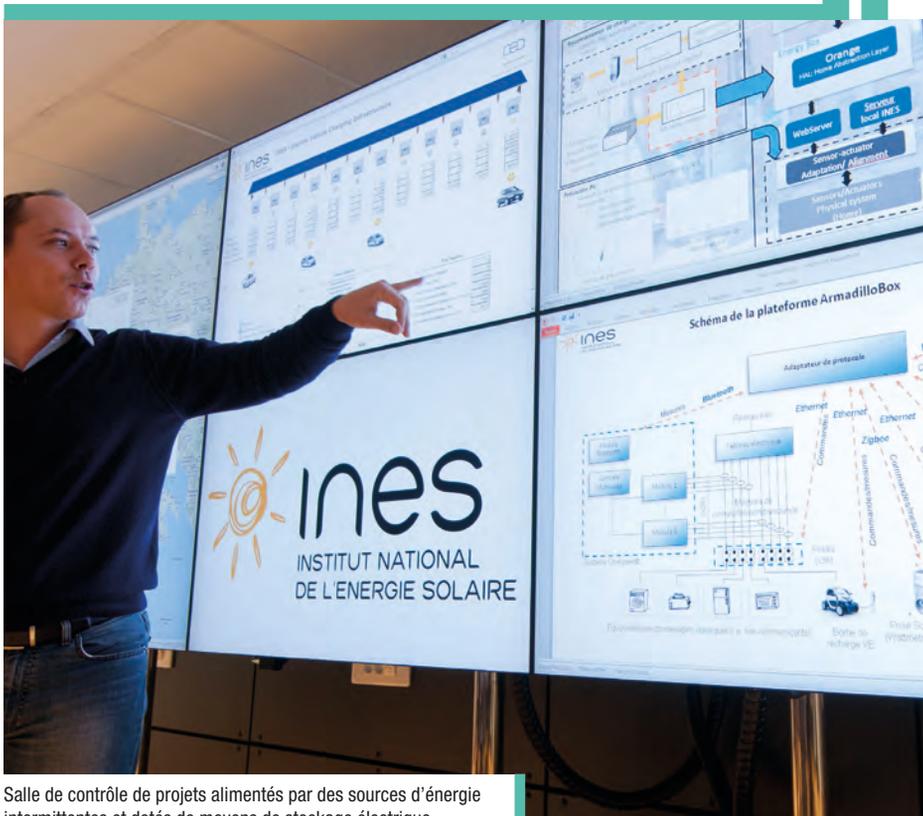
Efficacité énergétique

Nucléaire, solaire, biomasse, hydrogène... les sources d'énergie non émettrices de gaz à effet de serre se multiplient ! Ainsi que les modes de consommation. Dans ce nouveau mix énergétique, il est indispensable d'adapter l'offre à la demande, en optimisant le fonctionnement des réseaux et des systèmes. On parle alors d'efficacité énergétique, une approche globale sur laquelle travaille le CEA au sein de l'Institut national de l'énergie solaire. Ses équipes œuvrent en effet à l'utilisation rationnelle de l'énergie en développant des systèmes de pilotage. Par le biais de capteurs et logiciels innovants, ceux-ci apportent de l'« intelligence » aux réseaux électriques qui se transforment en smart-grids. Une façon de réduire les coûts et l'impact écologique liés à leur fonctionnement.

Ces smart-grids permettent par exemple de prévoir les flux des énergies renouvelables et d'optimiser leur disponibilité, malgré leur intermittence. Il sera alors possible de programmer le stockage de ces énergies en cas de surproduction ou leur réinjection dans le réseau pour répondre à une forte demande. Par ailleurs, les smart-grids offrent la possibilité de faire communiquer ces réseaux avec des véhicules électriques et des bâtiments intelligents basse consommation, à l'échelle d'un quartier, voire d'une ville ! Dans ce domaine, le CEA mène ses recherches depuis la conception jusqu'au test en situation réelle sur des plateformes de démonstration, comme la plateforme Incas à Chambéry.



En bonne intelligence



Salle de contrôle de projets alimentés par des sources d'énergie intermittentes et dotés de moyens de stockage électrique.

RECHERCHE TECHNOLOGIQUE POUR L'INDUSTRIE

Assurer un continuum entre recherche et industrie pour reconquérir la compétitivité de la France : telle est la mission confiée à CEA Tech, fort de l'écosystème grenoblois qu'il a su créer.

La clé de son modèle repose sur sa maîtrise des technologies clés génériques, qui en plus de diffuser l'innovation dans tous les secteurs d'activités, permettent de préparer l'Industrie du futur.

Créateur, catalyseur, accélérateur et diffuseur de technologies, il se positionne sur les niveaux 3 à 7 de l'échelle TRL. Et ce, grâce à son approche visionnaire de l'innovation ouverte ainsi qu'à des outils de pointe au sein de ses plateformes technologiques.

Valorisation technologique



L'offre technologique de CEA Tech a son showroom.

© E. Hopstudio / CEA

Immersion en innovation

Si la diffusion des technologies et leur valorisation industrielle n'est pas un long fleuve tranquille, elle peut compter sur un repère : l'échelle TRL (*Technology readiness level*). Conçue pour les projets spatiaux de la Nasa et de l'Esa, elle évalue le niveau de maturité d'une technologie sur neuf étapes : depuis l'observation du principe de base jusqu'à son intégration dans un système complet et son industrialisation.

Le CEA concentre ses efforts sur la passerelle stratégique des niveaux 3 à 7, c'est-à-dire du développement de la technologie jusqu'à sa validation dans un environnement réel. Pour cela, il dispose de plateformes technologiques uniques en Europe par leur masse critique d'experts et leur large spectre de compétences et d'équipements au meilleur niveau mondial. Véritables centres névralgiques depuis lesquels s'organisent les transferts technologiques, elles ciblent les enjeux sociétaux relatifs aux transitions énergétique,

numérique et médicale. Et cela, en proposant aux industriels un accès aux « technologies clés génériques » qui permettent de diffuser de l'innovation dans tous les domaines industriels et pour tout type d'entreprises.

Depuis 2012, il s'est ainsi vu confié une nouvelle mission par le gouvernement, au service de la compétitivité industrielle française. Il s'agit de déployer en régions son modèle CEA Tech, pour développer des activités de recherche spécifiques aux tissus industriels locaux. Cinq plateformes régionales de transfert technologiques (PRTT) ont à ce jour été implantées en régions (Bordeaux, Metz, Toulouse, Lille et Nantes), en filiation directe avec les plateformes technologiques de Grenoble et de Paris-Saclay.

Parallèlement, le CEA continue de renforcer son ressourcement scientifique en rapprochant ses équipes de recherche appliquée et de recherche fondamentale autour de programmes porteurs de rupture technologique.

L'échelle TRL



Échelle évaluant de 1 à 9 le niveau de maturité d'une technologie jusqu'à son intégration dans un système complet, et son industrialisation.



Recherche de base et appliquée

1, 2 et 3 : du principe à la preuve de concept technologique

La recherche scientifique, fondamentale ou amont, se traduit en recherche appliquée. Les études des propriétés de base d'une

technologie sont menées autour d'un concept spéculatif afin d'envisager des applications. S'ensuit une R&D active en laboratoire pour valider des hypothèses et fournir une preuve expérimentale du concept.

Recherche avancée et démo

4, 5, 6 : des composants au prototype

Les composants technologiques de base sont intégrés de façon à vérifier leur fonctionnement ensemble. Le cas échéant, ils sont intégrés à un système réaliste grâce

 Positionnement de l'offre technologique de CEA Tech



Démonstration technologique

aux équipements de plateformes technologiques. Cela conduit à la réalisation d'un prototype qui doit être démontré en environnement représentatif de l'application, puis optimisé en conformité avec un environnement opérationnel sur des lignes pilotes semi-industrielles.

Qualification et validation technologique

7,8,9 : du prototype au produit de série

La technologie, telle que validée sous la forme de son prototype, fonctionne dans les conditions prévues. Son application réelle est mise

en œuvre sur des lignes pilotes industrielles pour subir d'ultimes tests. Le système complet est alors validé lors de missions en environnement réel.

178

START-UP TECHNOLOGIQUES
DU CEA CRÉÉES DEPUIS 1972
(DONT 115 DEPUIS 2000).



6

TECHNOLOGIES CLÉS
GÉNÉRIQUES (KETS)

Domaines à forte intensité de connaissance et de R&D, aux cycles d'innovation rapides, avec des investissements importants et des emplois hautement qualifiés. CEA Tech se positionne sur les 6 KETS les plus prometteuses :

- **biotechnologies**
- **micro et nanoélectronique,**
- **nanotechnologies**
- **photonique**
- **matériaux avancés**
- **systèmes de production avancés**
(*advanced manufacturing*)

20

NOMBRE DE PLATEFORMES
TECHNOLOGIQUES DE CEA TECH

- **Design circuits intégrés et systèmes embarqués** (Grenoble, Paris-Saclay) : 3 000 m², 300 personnes, 20 M€ investis.
- **Nanoélectronique et micro-nanosystèmes** (Grenoble) : 7 200 m², 400 personnes, 500 M€ investis.
- **Photonique** (Grenoble - en cours de construction) : 12 600 m², 260 personnes, 39,5 M€ investis.
- **Manufacturing Avancé** (Paris-Saclay) : 2 000 m², 200 personnes, 20 M€ investis.
- **Impression grande surface** (Grenoble) : 500 m², 50 personnes, 10 M€ investis.
- **Métallurgie des poudres** (Grenoble) : 500 m², 20 personnes, 5 M€ investis.
- **Nanocaractérisation** (Grenoble) : 3 000 m², 80 personnes, 30 M€ investis.
- **Nanosécurité** (Grenoble) : 5 000 m², 150 personnes, 10 M€ investis.
- **Nano-biotechnologies** (Grenoble) : 5 500 m², 200 personnes, 6 M€ investis.
- **Clinatec** (Grenoble) : 5 000 m², 100 personnes, 27 M€ investis.
- **Doséo (Radiothérapie)** (Paris-Saclay) : 2 400 m², 35 personnes, 18 M€ investis.
- **Biomasse** (Grenoble) : 800 m², 40 personnes, 7 M€ investis.
- **Solaire photovoltaïque** (Chambéry) : 15 000 m², 200 personnes, 100 M€ investis.
- **Smart-Grid** (Chambéry) : 4 300 m², 30 chercheurs, 2 M€ investis.
- **Production hydrogène et stockage** (Grenoble) : 820 m², 40 personnes, 6 M€ investis.
- **Batteries** (Grenoble - Chambéry) : 3 000 m², 200 chercheurs, 40 M€ investis.
- **Piles à combustible** (Grenoble) : 500 m², 40 personnes, 6 M€ investis.
- **Mobilité électrique** (Grenoble - Chambéry) : 1 500 m², 20 personnes, 4 M€ investis.
- **Micro-sources d'énergie** (Grenoble) : 1 000 m², 50 personnes, 20 M€ investis.
- **Thermique** (Grenoble - Chambéry) : 1 500 m², 75 personnes, 15 M€ investis.



UN PEU D'HISTOIRE

1967

Création du CEA-Leti (Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information).

1972

Première start-up du CEA, EFCIS, essaimée du CEA-Leti, spécialisée dans la réalisation de circuits électroniques, qui deviendra ST Microelectronics.

1986

Création de Sofradir, issue du CEA-Leti avec la participation de Thomson-CSF et de Sagem, devenue leader européenne dans les détecteurs infrarouges.

1992

Essaimage de Soitec, start-up du CEA-Leti, devenu le leader mondial du SOI (silicium sur isolant).

1999

Création de CEA Investissement, filiale du CEA contribuant au lancement de nouvelles entreprises.

2006

Inauguration du campus d'innovation Minatec créé à Grenoble par le CEA, INP Grenoble et les collectivités territoriales.

2013

Lancement des premières plateformes régionales de transfert technologiques de CEA Tech.

Industrie du futur



L'heure numérique a sonné !

Maintenir une activité industrielle puissante et innovante, génératrice de richesses et d'emplois, en France et en Europe : tel est l'enjeu de l'industrie du futur. Elle intervient dans un contexte bousculé par les transitions en cours (énergétique, écologique, économique, numérique), qui se traduisent par de nouvelles relations au citoyen, au transport, à la ville de demain, à la société dans son ensemble. Outre la modernisation technologique et numérique de l'outil de production, l'objectif de l'industrie du futur est d'accompagner les entreprises, et leurs opérateurs, dans la transformation de leurs modèles d'affaires, de leurs organisations, de leurs modes de conception et de commercialisation.

Emblème du renouveau industriel français, l'industrie du futur mobilise toutes les forces vives de la société. Parmi eux, les acteurs de la recherche dont CEA Tech, partenaire incontournable de nombreuses initiatives : Nouvelle France Industrielle, Capme'up, Robot Start PME et, depuis

quelques mois, Alliance Industrie du futur..... Toutes ambitionnent d'offrir aux entreprises, quelle que soit leur taille, un accès personnalisé aux solutions technologiques du « manufacturing avancé » : robotique collaborative, réalité augmentée et virtuelle, monitoring et contrôle avancé, sûreté et sécurité des systèmes, etc. Le CEA-List, membre fondateur de l'Alliance Industrie du futur, développe ces technologies numériques, du poste de travail dans l'usine jusqu'à l'internet des objets, également domaine d'expertise du CEA-Leti.

Du consommateur au producteur, de nombreuses interfaces véhiculent l'information, passant du monde réel au monde virtuel, des microcomposants aux infrastructures logicielles à grande échelle. Et la convergence de toutes ces technologies se traduit par une intelligence, toujours plus grande, des systèmes désormais connectés et hautement sécurisés ; déployant ainsi un nouveau paradigme, centré sur l'humain et ouvert sur l'écosystème.

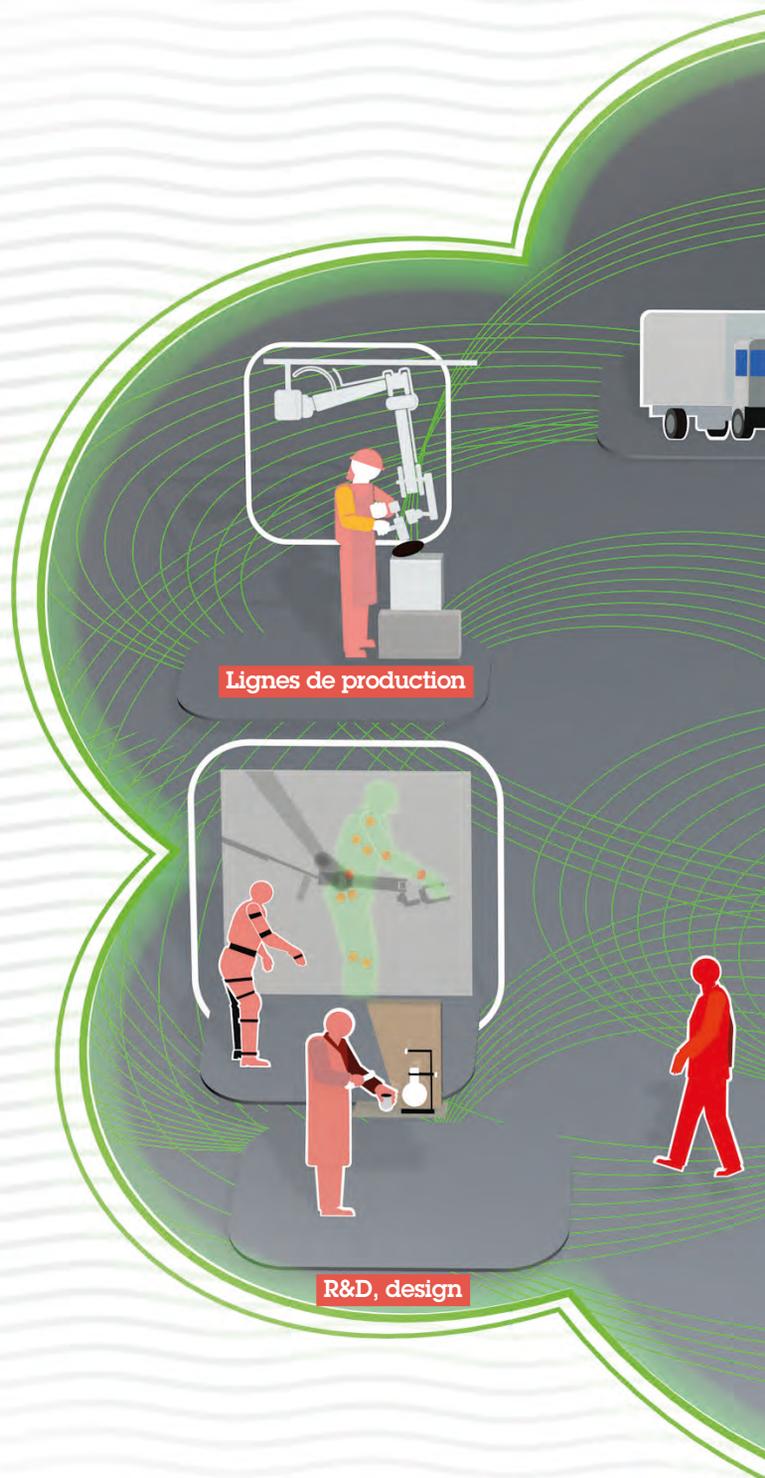
L'industrie du futur



Ecosystème agile et flexible, où les cinq constituants types d'un système de production et l'ensemble des processus sont en totale interaction. Hautement technologique, il est centré sur l'humain et au cœur de son environnement pour mieux répondre aux nouveaux besoins sociétaux.

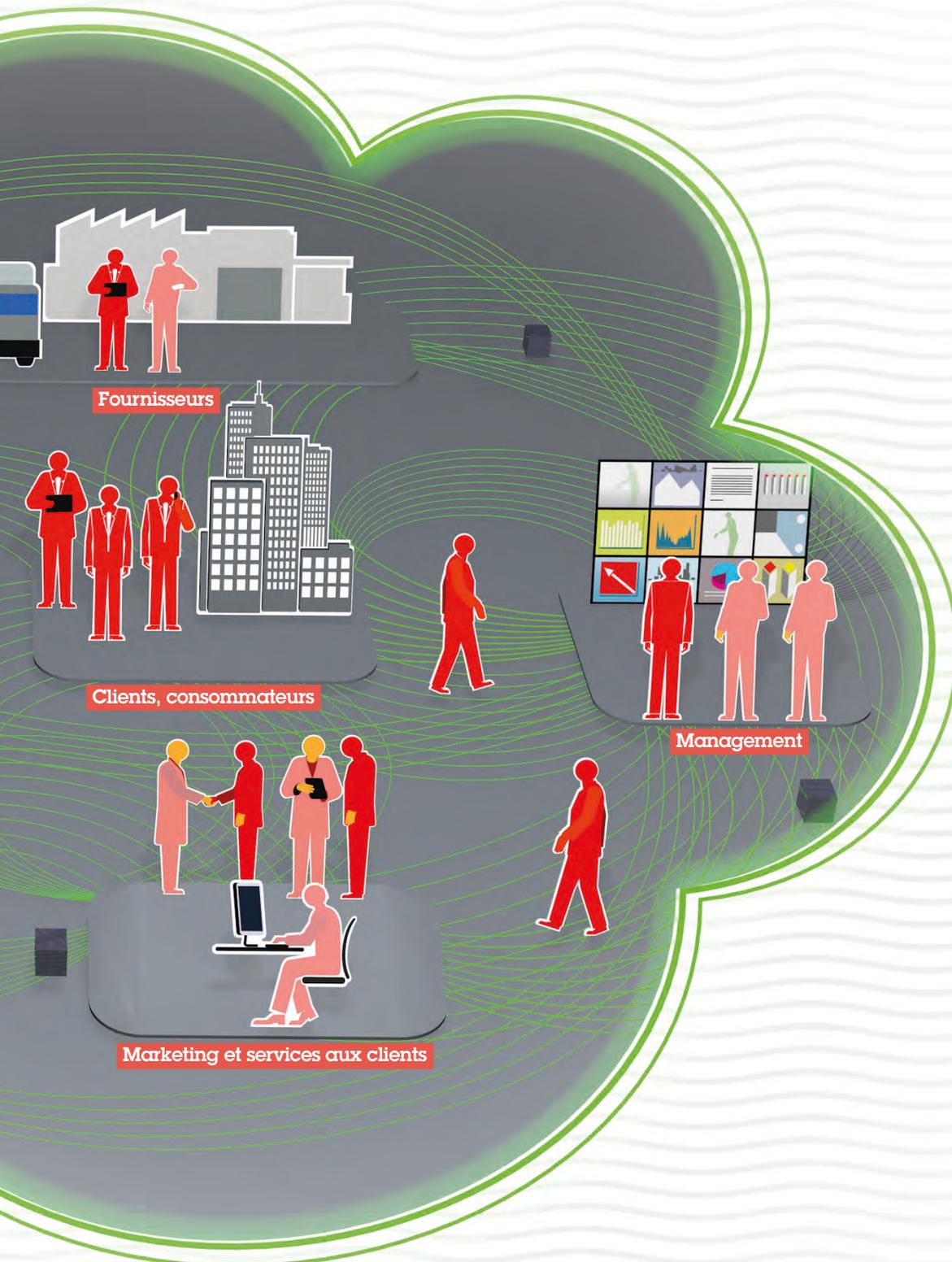
Les caractéristiques d'une usine innovante, compétitive, performante, sûre, attractive

- Usine centrée sur l'humain, focalisée sur les attentes et les compétences des collaborateurs, et attractive pour les talents dont elle a besoin.
- Usine qui valorise ses opérateurs, affranchis des tâches pénibles ou répétitives grâce à l'automatisation, la robotique collaborative et/ou la réalité augmentée.
- Usine connectée avec les fournisseurs et les clients via des réseaux sécurisés.
- Usine qui fournit des solutions complètes et services associés, individualisés, durables, compétitifs, quels que soient les volumes.
- Usine capable de recomposer sa chaîne de valeur pour s'adapter aux évolutions du marché et des technologies, avec des modes et outils de production flexibles et reconfigurables.
- Usine dont les lignes de production et de logistique sont conçues, exploitées et optimisées grâce aux outils numériques, pour plus de performance, de sûreté et de sécurité des biens et des personnes.
- Usine connectée à l'internet des objets et aux clouds, via des réseaux sécurisés, tirant partie du big data pour piloter la production directement à partir des objets, et assurer la qualité et la traçabilité des opérations et des produits.
- Usine évoluant dans la dynamique de l'économie circulaire pour optimiser et économiser les matières premières, l'énergie, les ressources humaines et pour diminuer son impact environnemental.



De nombreux domaines technologiques

- Robotique interactive et collaborative (ou cobotique)
- Réalité virtuelle et réalité augmentée
- Mesure et contrôle non destructif
- Surveillance d'ouvrages, maintenance prédictive
- Instrumentation et intégration de capteurs
- Big data, systèmes d'analyse, diagnostic, prévention et prescription automatique
- Traitement temps réel
- Composants pour la fiabilité, la sûreté et la cybersécurité des logiciels et systèmes
- Systèmes et processus énergétiquement fiables et économes
- Internet des objets
- Ingénierie de la connaissance et des systèmes complexes
- Matériaux et procédés avancés



En route vers l'Industrie du Futur



Utilisation d'un cobot.

La transition industrielle repose sur trois grands domaines technologiques, identifiés depuis des années par les équipes de CEA Tech...

Manufacturing avancé

Identifié par les experts comme une technologie clé générique, ce concept vise la transformation technologique, numérique et économique de la production industrielle. Il repose notamment sur une approche systémique de toute la chaîne de valeur de l'usine (interne et externe) : les fonctions de production réelle sont combinées avec une représentation numérique de l'usine afin de simuler et anticiper divers scénarios de production, de maintenance, etc. Pour cela, le manufacturing avancé, qui fait l'objet d'un programme dédié au CEA-List, s'appuie entre autres sur la robotique collaborative, la réalité virtuelle et augmentée, le contrôle non destructif...

Internet des objets

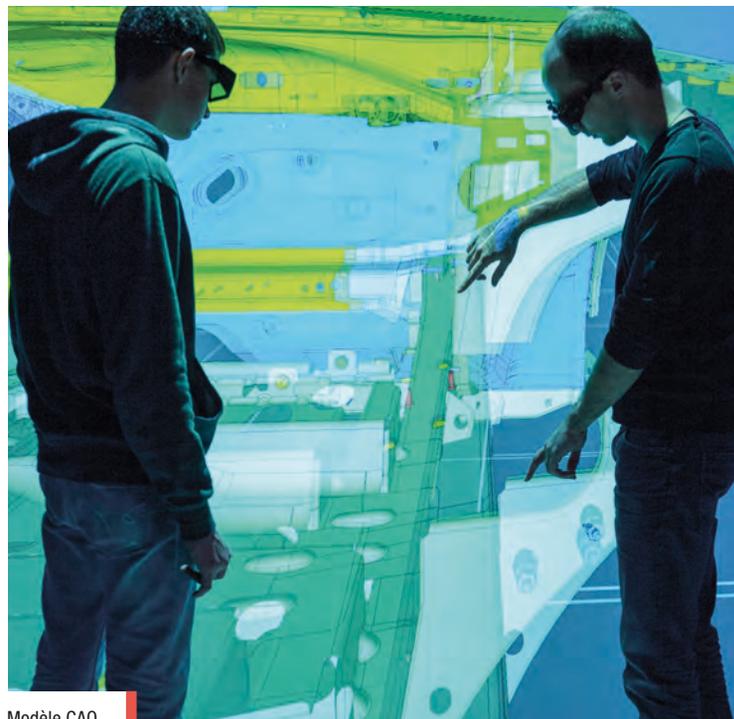
L'industrie du futur est nécessairement connectée car ses ressources, humaines et matérielles, ainsi que ses processus sont en interaction. Cette approche requiert l'optimisation et l'innovation de plusieurs fonctions : conception et intégration de capteurs, protocoles de partage et de sécurisation des données, techniques de communication radiofréquences (notamment tags RFID ou système de géolocalisation intra-muros), sobriété

énergétique des dispositifs (techniques de récupération d'énergie) et des composants électroniques (technologie FD-SOI du CEA-Leti). Ces recherches sont développées dans le cadre du programme « Internet des objets » du CEA-Leti, avec des équipes du CEA-List.

Big data

L'écosystème de l'industrie du futur génère quantités de données, massives ou non, s'inscrivant dans la problématique du big data. CEA Tech propose

différentes technologies autour de cette thématique : pour sécuriser les circuits de traitement et de stockage (cybersécurité); optimiser et harmoniser la gestion et l'analyse de données hétérogènes (aide à la décision, data mining, ingénierie de la connaissance et des systèmes); également pour proposer des solutions visant à réduire l'impact énergivore des serveurs qui ont besoin de plus de puissance de calcul (par exemple avec la photonique sur silicium et aussi le FD-SOI).



Modèle CAO.



UN PEU D'HISTOIRE

ANNÉES 1980

Premier prototype de robot avec téléopération assistée par ordinateur, développé par le CEA pour intervenir à distance dans des centrales nucléaires.



2001

Création du CEA-List (laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies) à Saclay



2002

Naissance de sa start-up Haption, spécialisée en interface haptique de réalité virtuelle.



2003

Création de sa start-up M2M, dédiée à l'instrumentation pour le contrôle non destructif



2009

Création de sa start-up Diotasoftware, de réalité augmentée pour l'industrie.



2009

Développement du premier exosquelette européen, Hercule, avec la société RB3D.



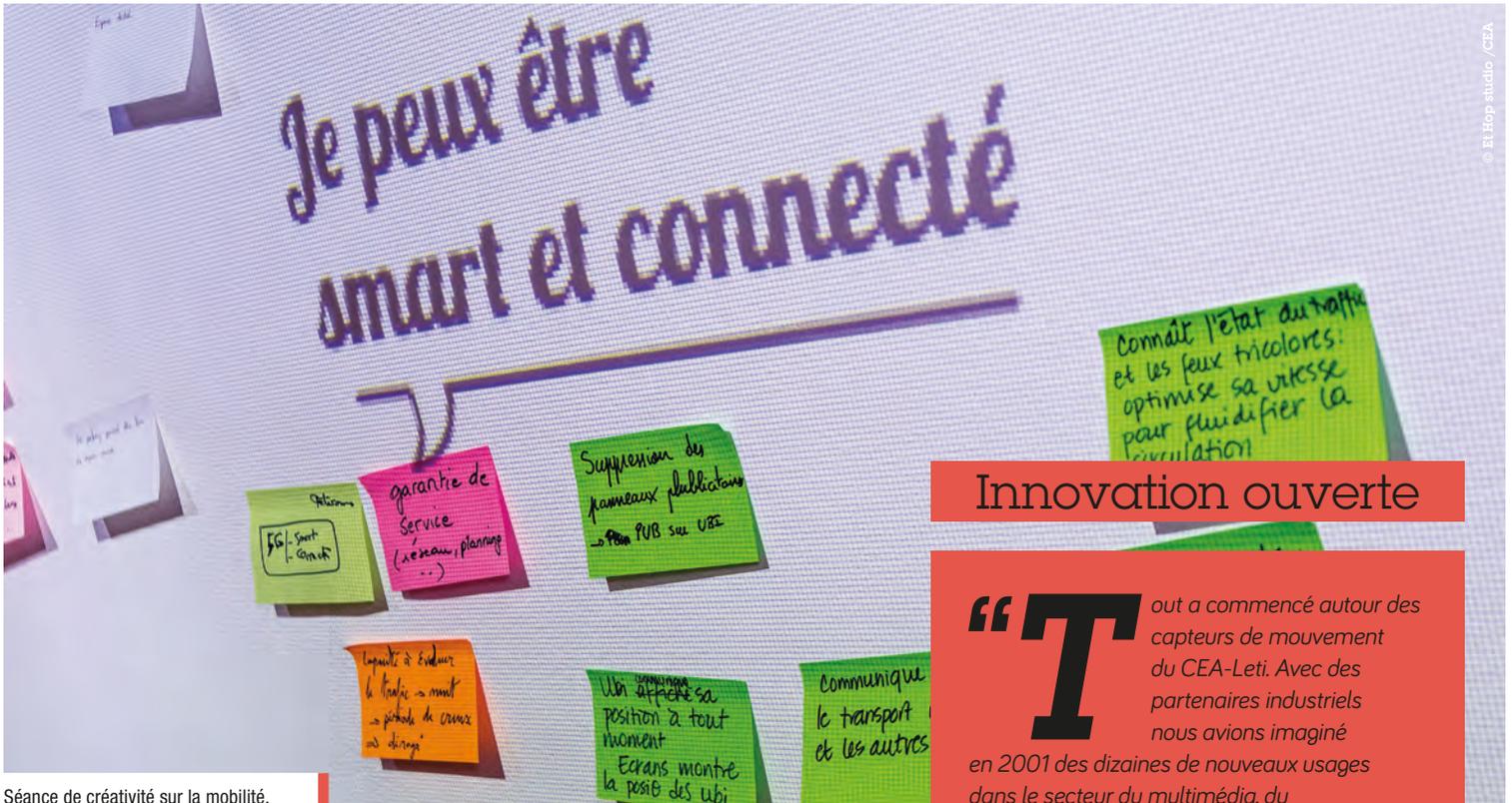
2010

Essaimage de sa start-up TrustinSoft, dédiée aux outils d'analyse de code pour la cybersécurité



2013

Essaimage de sa start-up TrustinSoft, dédiée aux outils d'analyse de code pour la cybersécurité



Séance de créativité sur la mobilité.

Du bon usage de la techno



© EN Hop studio / CEA

Innovation ouverte

“**T**out a commencé autour des capteurs de mouvement du CEA-Leti. Avec des partenaires industriels nous avons imaginé

en 2001 des dizaines de nouveaux usages dans le secteur du multimédia, du sport et de la santé. Cinq ans après, ST Microelectronics commercialisait ses micro-capteurs pour Nintendo et, en 2007, le CEA-Leti essaimit la start-up Movea, rachetée en 2014 par Invensense, qui vend aujourd'hui ses capteurs à Free, Décathlon et s'ouvre à d'autres marchés mondiaux » se souvient Michel Ida, ingénieur au CEA-Leti qui a fondé en 2001 le Minatec Ideas Laboratory à Grenoble.

Pionnière en France, cette structure fédère chercheurs, industriels, sociologues, marketers, designers et artistes selon une approche devenue incontournable : l'innovation ouverte. Elle consiste à mutualiser les regards, notamment au sein de séances de créativité, pour interroger les technologies, leurs usages et créer de la valeur. Cette démarche collaborative et ouverte s'est également déployée dans d'autres dispositifs du CEA (projets Pepite, IRT Nanoélec...), à destination d'entreprises de toute taille, notamment TPE ou PME. En plus des showrooms, qui facilitent l'émergence des idées grâce à des démonstrateurs offrant une immersion dans un univers de référence, l'offre CEA Tech repose aussi sur des services confidentiels de conseil, de benchmark, de prototypage rapide. De quoi permettre aux entreprises, éventuellement, de poursuivre l'aventure sur les plateformes technologiques de CEA Tech, avant d'attaquer les marchés.



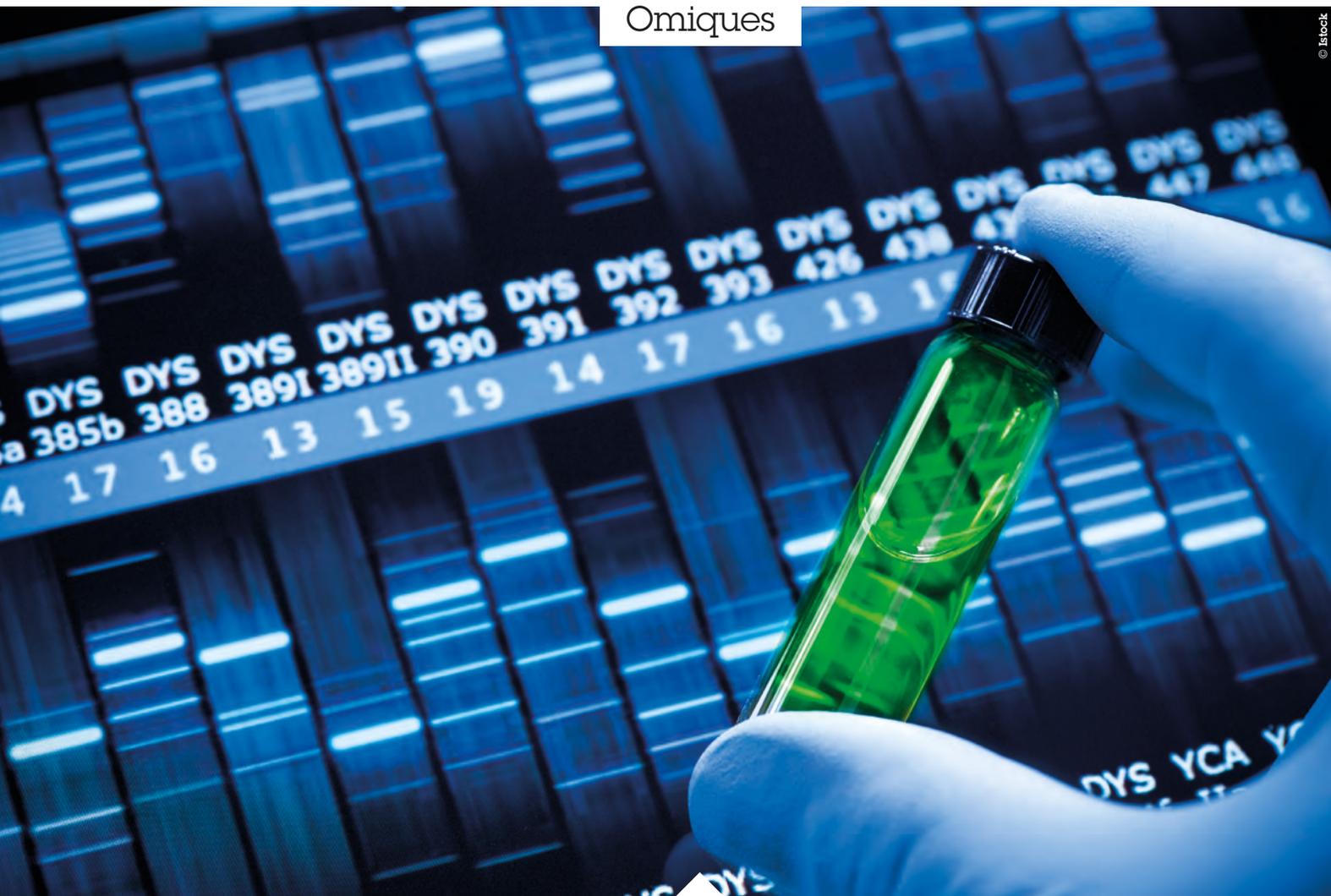
RECHERCHE FONDAMENTALE

Créer des concepts et de nouvelles idées, trouver les briques manquantes pour aller encore plus loin... Cette mission primordiale guide la recherche fondamentale du CEA, tant dans les sciences du vivant que dans les sciences de la matière.

De par l'excellence scientifique de ses équipes, et les très grands instruments de recherche qu'elles conçoivent et exploitent avec leurs pairs, le CEA fait figure de leader dans plusieurs domaines.

Précurseur en biologie du vivant, il s'illustre notamment dans ces nouvelles méthodes biologiques à grande échelle appelées « omiques » ; il a également initié en France la mécanique quantique et, aujourd'hui, explore la « quantronique »...

Omiques



Du sur mesure pour la santé

A chaque individu, son diagnostic et son traitement : voici tout l'objet de la médecine personnalisée. Ce domaine est en plein essor, en particulier dans le cadre de la recherche et également en pratique clinique, en France comme à l'étranger.

Elle s'appuie sur certains « omiques » : génomique (séquençage du génome), protéomique (étude des protéines), métabolomique (suivi du métabolisme) et transcriptomique (processus de transcription du génome par les ARN messagers). Dans le domaine de la santé, ces méthodes de biologie à grande échelle sont utilisées, notamment pour identifier des mutations génétiques, des biomarqueurs de diagnostic ou de suivi thérapeutique, par exemple pour les cancers. Avec la connaissance du système immunitaire, le recours à l'imagerie médicale, le développement de micro-dispositifs médicaux, de nouvelles thérapies se dessinent, toujours au plus près des patients.

Dans cet enjeu, la génomique est déterminante puisqu'elle permet d'identifier des gènes de prédisposition à une

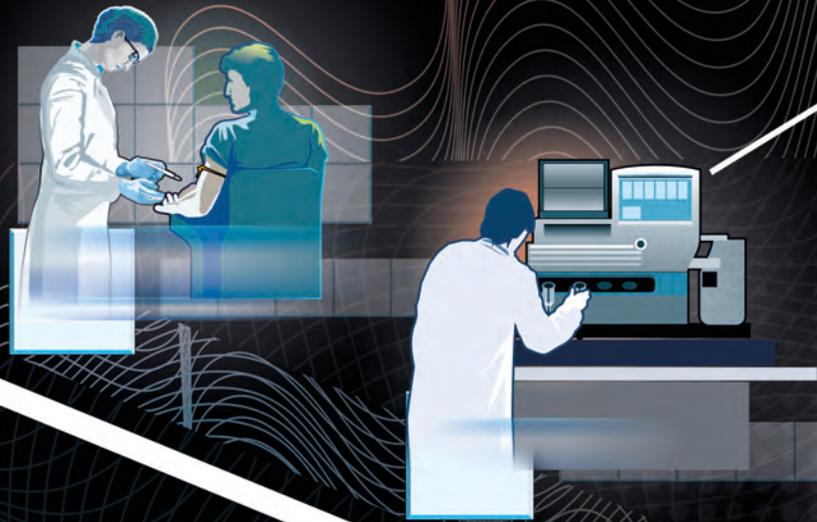
maladie, ou encore d'établir le profil génétique de cellules cancéreuses. S'il aura fallu treize ans pour séquencer le premier génome humain, des laboratoires peuvent aujourd'hui le faire en quelques jours. C'est notamment le cas du CEA-IG (Centre national de génotypage), grâce à son expertise et à ses équipements de pointe, comme les séquenceurs haut-débit ! Pour autant, la génomique nécessite d'être optimisée, notamment pour offrir aux patients et organismes de santé des prestations plus compétitives et hautement sécurisées. Elle appelle ainsi le développement et l'amélioration des outils, la conduite de projets en synergie avec d'autres disciplines, allant de la microfluidique à la data science (gestion des *big data*).

Autant d'axes de recherche qui mobilisent différentes équipes du CEA, notamment pour répondre aux nouveaux besoins de la « Médecine du futur », identifiée par le gouvernement dans le cadre de ses réflexions sur la Nouvelle France Industrielle.

La médecine génomique personnalisée



Dans le cas d'un cancer, il s'agit de séquencer le génome des cellules cancéreuses pour dresser une carte d'identité de la tumeur et l'intégrer à la décision thérapeutique en vue d'un traitement personnalisé.



Prélèvements

Le patient se présente à l'hôpital pour deux types de prélèvements :

- cellules saines par prise de sang ;
- cellules cancéreuses récupérées directement au niveau de la tumeur.

Séquençage à haut débit

À partir des prélèvements, des appareils automatisés (séquenceurs) effectuent le séquençage à haut débit des **génomés** du patient et de sa tumeur en quelques jours. Ils déterminent l'ordre des bases nucléiques (adénine-A, cytosine-C, guanine-G, thymine-T) pour reconstituer la séquence d'ADN (3 milliards de bases). C'est grâce à la lecture de plusieurs millions de séquences en parallèle que cette méthode a révolutionné les analyses en génomique.

DÉFINITIONS

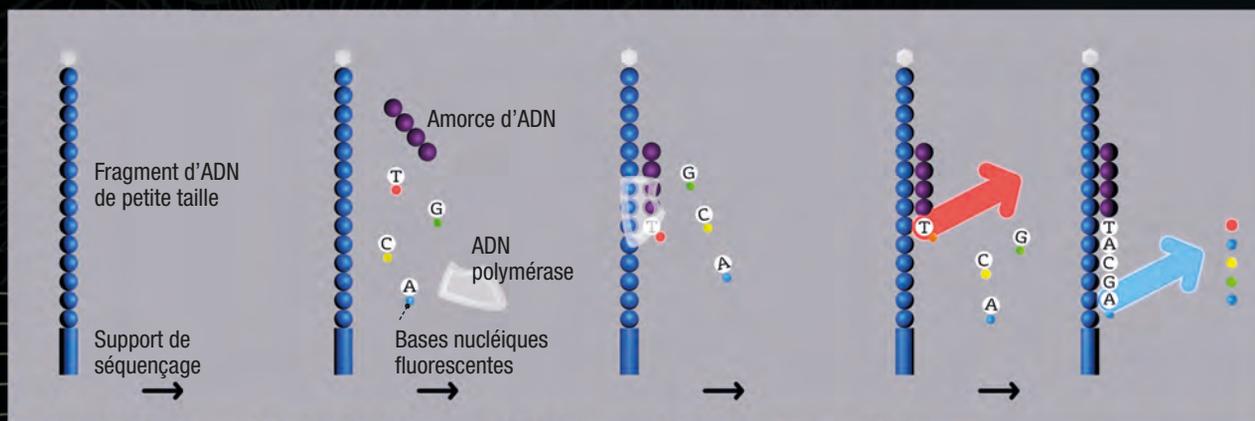
Génome

Ensemble du matériel génétique (gènes) d'un individu.

ADN polymérase

Complexe enzymatique intervenant dans la réplication, la réparation et la recombinaison de l'ADN au cours du cycle cellulaire.

Les étapes du séquençage



1 Préparation de l'ADN

Les molécules d'ADN extraites du prélèvement sont morcelées en fragments de petite taille (350 bases), leurs extrémités sont modifiées pour les accrocher au support de séquençage.

2 Mélange

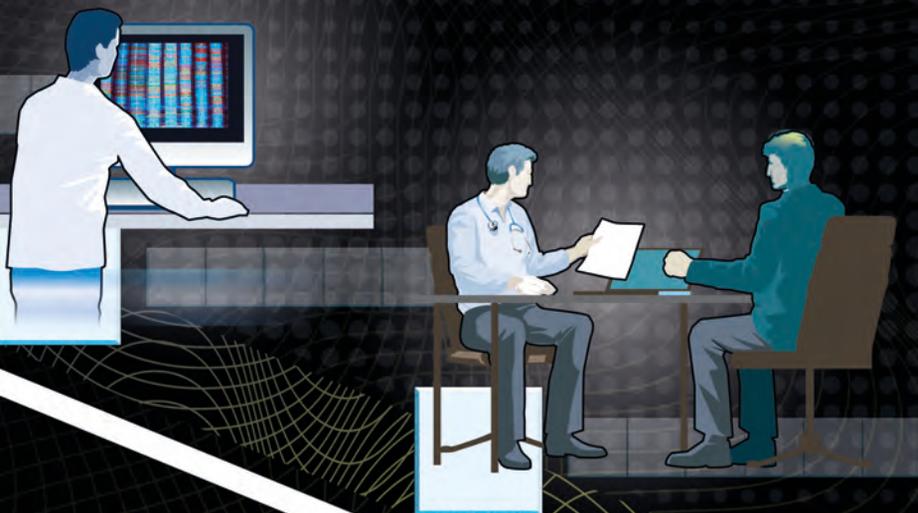
Les brins d'ADN immobilisés sont mis en contact avec les acteurs de la synthèse d'ADN : amorce d'ADN, **ADN polymérase** et bases nucléiques fluorescentes (A en bleu, T en rouge, C en jaune et G en vert).

3 Réplication

L'amorce d'ADN se fixe sur le brin matrice. L'ADN polymérase synthétise alors le brin complémentaire en ajoutant successivement des bases nucléiques qui reforment les paires : A-T (ou T-A) et C-G (ou G-C).

4 Acquisition

Quand l'ADN polymérase ajoute une base nucléique, la synthèse du brin s'interrompt pour émettre un rayonnement de couleur spécifique à cette base incorporée. Après acquisition du signal lumineux, la polymérase peut ajouter la prochaine base nucléique. Cette opération est répétée jusqu'à obtention de lectures d'une longueur d'environ 200 bases.



Analyse bio-informatique

À partir des données brutes issues du séquençage (100 giga octets environ pour un génome humain), des analystes vérifient la qualité des lectures, identifient, classent et trient les différentes séquences d'ADN à l'aide de logiciels performants. Après l'assemblage de milliard de lectures, la séquence du génome entier est ainsi reconstituée.

La comparaison entre l'ADN « normal » et l'ADN tumoral permet ensuite de déceler les gènes et les mutations impliqués dans la pathologie. Ces analyses facilitent aussi la détection de variations du génome impliquées dans la réponse au traitement.

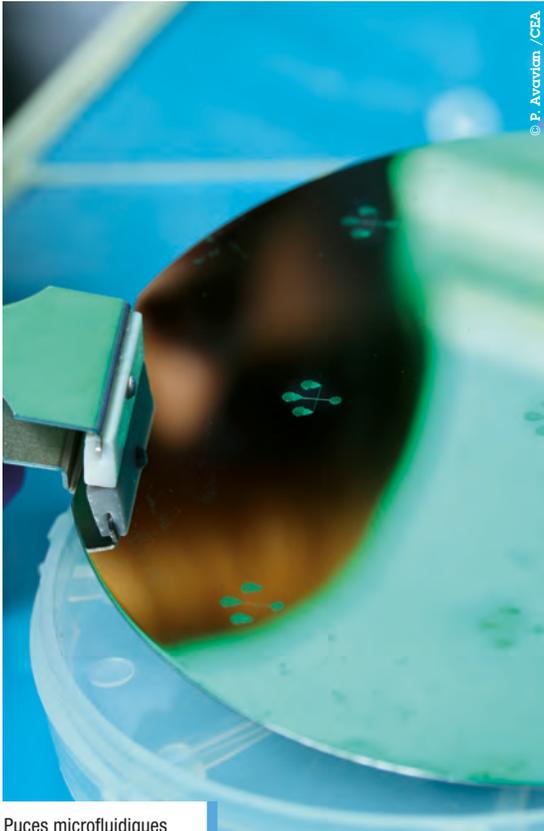
Diagnostic et thérapie personnalisée

À partir du profil génomique de chaque tumeur, les médecins peuvent proposer à leurs patients des essais cliniques en vue de développer un traitement ciblé.

Sur toutes les échelles

De la microfluidique...

En manipulant des petits volumes de liquides, la microfluidique permet d'optimiser l'analyse des prélèvements pour étudier rapidement des macromolécules, (comme l'ADN), des protéines et des cellules. Avantages : les procédés sont miniaturisés et automatisés. De plus, la microfluidique permet d'intégrer dans un seul dispositif plusieurs opérations successives d'un protocole complexe d'analyse. Une aubaine pour des tests diagnostic in vitro rapides ! Au CEA-Leti, une équipe développe par exemple un système de manipulation de gouttes dans des canaux micrométriques, sans vannes.



Puces microfluidiques

...à la data science

Le séquençage d'un génome humain représente 100 Gigaoctets de données ! Preuve que l'ensemble des méthodes de biologie à grande échelle, au service de la médecine personnalisée, génère un volume considérable de données hétérogènes et personnelles... En plus de leur analyse, qui requière un haut niveau d'expertise des équipes des sciences du vivant, ces big data doivent être collectées, stockées et partagées selon des protocoles garantissant leur fiabilité et leur confidentialité. Les équipes du CEA disposent à ce titre, de très gros moyens de calcul, ceux du CCRT (voir page 15), et des compétences de CEA Tech en traitement des données, logiciels et cybersécurité (voir page 44).

Le CEA, un acteur des omiques

- Génomique : coordination du projet investissement d'avenir « France génomique » pour mutualiser les infrastructures et ressources humaines françaises en génomique et en bioinformatique (Génoscope et Centre national de génotypage).
- Protéomique : coordination du Projet investissement d'avenir ProFI (Proteomic french infrastructure) pour déterminer le protéome d'espèces d'intérêt agronomique et quantifier les biomarqueurs de maladies dans les fluides biologiques humains (CEA-IRTSV).
- Métabolomique : participation au projet investissement d'avenir MetaboHUB et coordination du projet Carte d'Identité Métabolique pour déterminer les effets des médicaments sur les enzymes du métabolisme.



UN PEU D'HISTOIRE

2001

Premier séquençage d'un génome humain entier par un consortium international.

2007

Création de l'Institut de génomique du CEA rassemble Le centre national de génotypage et le Génoscope.

2009

Participation de la France au programme ICGC (International Cancer Genome Consortium)

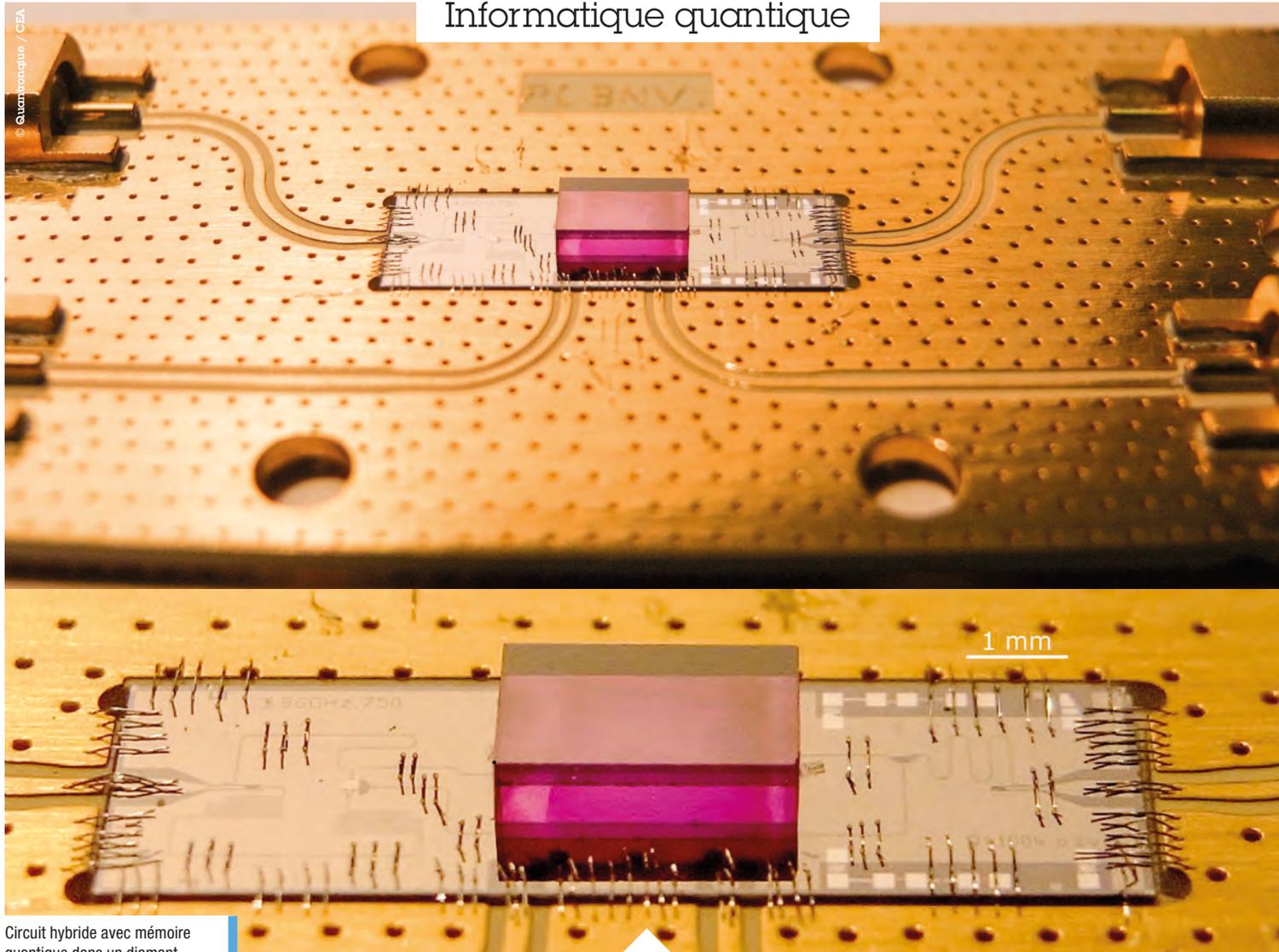
2014

Carte d'identité de la tumeur rénale.



Préparation d'un échantillon d'ADN pour séquençage.

Informatique quantique



Circuit hybride avec mémoire quantique dans un diamant.

Le don d'ubiquité

En expliquant durant le XX^e siècle l'essentiel des propriétés de la matière sous toutes ses formes, la mécanique quantique a effectué une révolution de notre compréhension du monde physique. Elle a conduit à des technologies modernes comme l'électronique, le laser, etc. Pourtant, les machines utilisées aujourd'hui sont classiques, dans le sens où elles ne font pas appel dans leur principe de fonctionnement aux concepts fondamentaux de la physique quantique. Par exemple, celui de « superposition quantique des états » qui permet à un système d'être simultanément dans plusieurs états à la fois (ubiquité), et à un circuit électrique d'être à la fois dans deux états électriques normalement incompatibles.

La démonstration durant les années 1990 que des machines exploitant cette propriété pourraient être bien plus efficaces que leurs versions classiques, a amorcé une seconde révolution quantique en ingénierie, notamment pour le traitement de l'information.

Imaginé alors, l'ordinateur quantique serait ainsi capable de résoudre certains problèmes pratiques difficiles hors de portée des ordinateurs conventionnels : factorisation des grands nombres, recherche dans une base de données non organisée, détermination de structures moléculaires complexes... Mais, la réalisation d'une telle machine fait face à une difficulté majeure : la décohérence, selon laquelle l'interaction inévitable d'un système physique avec son environnement détruit très rapidement toute superposition d'états quantiques qui se trouve alors transformée en un simple état classique.

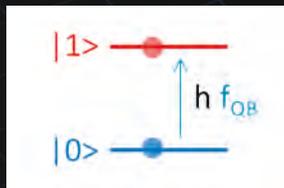
En réalisant des circuits supraconducteurs sans dissipation et très bien isolés de leur environnement électrique à très basse température, la communauté scientifique internationale (dont les physiciens du groupe Quantronique du CEA-Iramis) a réussi à faire entrer des circuits électriques encore très simples dans le régime quantique, et même à réaliser des processeurs quantiques, certes très élémentaires. L'ordinateur quantique verra-t-il le jour au XXI^e siècle... ?

Un processeur quantique élémentaire

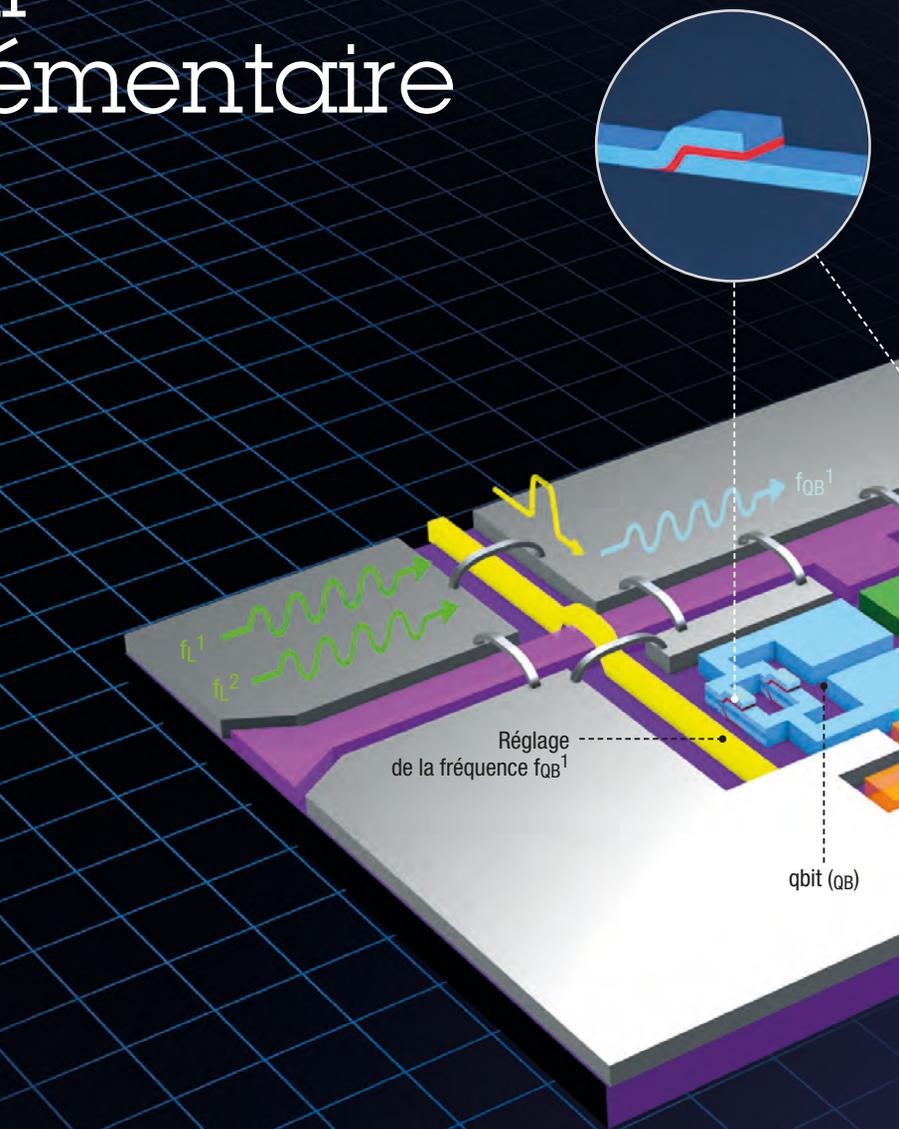


Prototype de processeur quantique élémentaire basé sur des composants « Josephson ». Ce circuit, entièrement supraconducteur et fonctionnant à 20 mK, est fabriqué par des techniques standard de microélectronique.

Qu'est-ce qu'un bit quantique (qbit) ?



Dans un ordinateur classique, l'information est stockée dans un ensemble (registre) de cases mémoires, les bits, dont la valeur est soit 0, soit 1. Un bit quantique (qbit) a, quant à lui, deux états quantiques $|0\rangle$ et $|1\rangle$, séparés par une différence d'énergie définissant sa fréquence (f_{QB}), et peut être à la fois dans ces deux états. Au cours d'un algorithme (succession d'opérations dites « portes logiques »), le registre de qbits se trouve dans une superposition quantique de tous ses états possibles ($|00\dots0\rangle$, $|10\dots0\rangle$, ..., $|11\dots1\rangle$), permettant un calcul massivement parallèle.



Fonctionnement

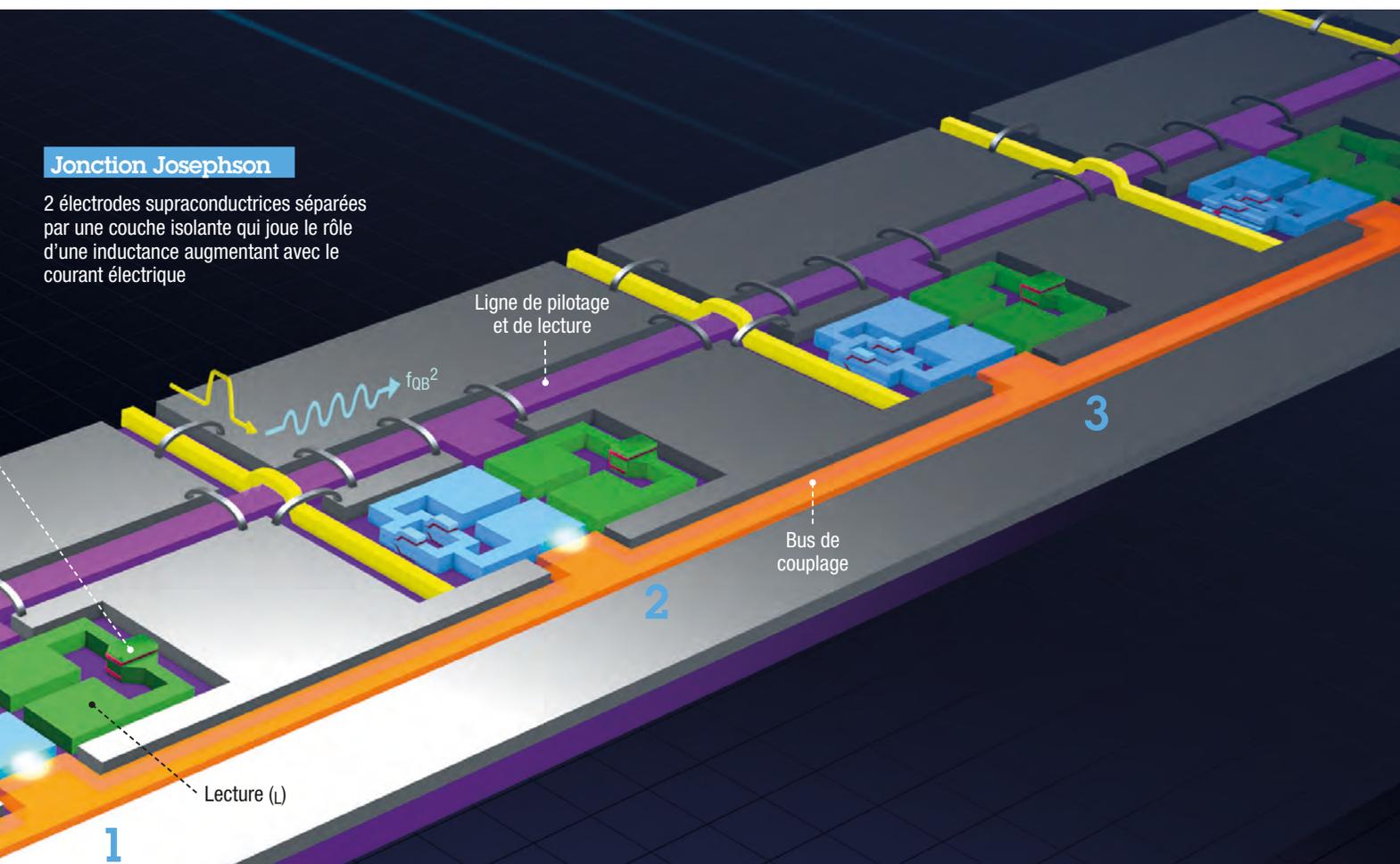
Des cellules identiques (**1,2,3...**) sont placées le long d'une ligne électrique de pilotage et de lecture des bits quantiques (qbits). Chaque cellule comprend un qbit et son propre circuit de lecture, ainsi qu'une ligne électrique pour changer la fréquence f_{QB} du qbit. Tous les qbits sont couplés à un résonateur micro-onde de fréquence f_{QB} servant de bus de couplage.

- Pour implémenter une porte logique à 1 qbit, une impulsion microonde à la fréquence d'un qbit particulier lui est envoyé : elle modifie ainsi son état de superposition de $|0\rangle$ et de $|1\rangle$.

- Pour une porte à 2 qbits, la fréquence des deux qbits choisis (ici **1** et **2**) est amenée temporairement près de celle du bus de couplage : deux impulsions sur les lignes de réglage font que les deux qbits échangent un photon à travers le bus.
- Finalement, les circuits de lecture sont activés simultanément par des impulsions micro-onde (à leur fréquence f_L) plus ou moins retardées/déphasées selon le résultat 0 ou 1 lu.

Jonction Josephson

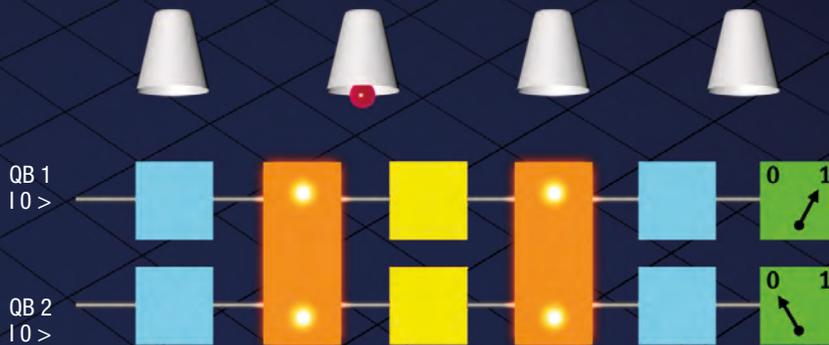
2 électrodes supraconductrices séparées par une couche isolante qui joue le rôle d'une inductance augmentant avec le courant électrique



Exemple de l'algorithme de Grover



La température de fonctionnement du circuit est de 20 mK (millikelvin), soit - 273,13° Celsius



Comment trouver la boule cachée sous l'un des quatre gobelets en n'utilisant qu'une fois la fonction « soulever-un-gobelet » ? Impossible classiquement car, soulever un gobelet au hasard ne découvre la boule qu'une fois sur quatre. Mais, c'est possible avec l'algorithme quantique de Grover qui soulève les quatre gobelets en un seul appel à la fonction « soulever-un-gobelet ».

Cet algorithme est une succession de portes logiques à 1 qbit (carrés bleus et jaunes) et 2 qbits (rectangles orange) suivie d'une lecture finale (carrés verts), avec 10 impulsions en tout.



Montage d'un circuit quantique supraconducteur dans un réfrigérateur développé au CEA.

La quantronique du CEA a plus d'un tour dans son sac

Imaginons des circuits tels de véritables atomes artificiels, dans lesquels les variables électriques (comme le courant) sont aussi quantiques que la vitesse d'un électron dans un atome. Une vision à portée de main du Groupe Quantronique du CEA-Iramis qui, en 1997, a notamment réalisé un circuit supraconducteur à une jonction Josephson : la boîte à paires de Cooper. De quoi inspirer d'autres leaders mondiaux en la matière, comme la société NEC ou l'Université de Yale. Cette dernière, en 2006, a livré la version « transmon » de ce circuit, aujourd'hui utilisé par tous les acteurs du domaine, dont Google, pour réaliser des processeurs quantiques élémentaires.

Les recherches du groupe du CEA sont plus larges : qu'il s'agisse de tester des prédictions importantes en physique mésoscopique (échelle de grandeur à laquelle la mécanique quantique régit le transport électronique), grâce à des contacts

métalliques de taille atomique ; ou d'obtenir une preuve de concept pour une mémoire quantique à base d'électrons piégés dans le diamant, ouvrant la voie à des processeurs quantiques hybrides combinant circuits et entités microscopiques...

Les « quantroniciens » ont également amélioré par quatre ordres de grandeur la sensibilité de la Résonance Paramagnétique Electronique, une étape intermédiaire vers le contrôle quantique d'un spin électronique unique !

Des recherches parallèles sont également menées. Ce qui a notamment permis au Groupe Nanoélectronique du CEA-Iramis d'injecter dans un circuit des électrons uniques sans exciter les autres électrons présents. De même, des chercheurs du CEA-Inac ont exploité des transistors CMOS de très petite taille réalisés au CEA-Leti pour faire passer un courant par un seul état quantique électronique...



UN PEU D'HISTOIRE

1985

Création du Groupe Quantronique du CEA, à Saclay, dédié à l'étude des circuits électroniques quantiques.

1982-1987

Démonstration du caractère quantique d'un circuit à jonction Josephson lors d'expériences à l'Université de Berkeley (USA) et au CEA.

1994-1996

Invention, par Peter Shor et Lov Grover, de deux algorithmes quantiques de factorisation et de recherche dans une base de données, plus efficaces que leurs homologues classiques.

1996-1999-2002

Développement au CEA de la boîte à paire de Cooper, circuit supraconducteur utilisé par NEC pour réaliser le premier bit quantique (qbit) puis par le CEA pour faire le premier qbit fonctionnel.

2010

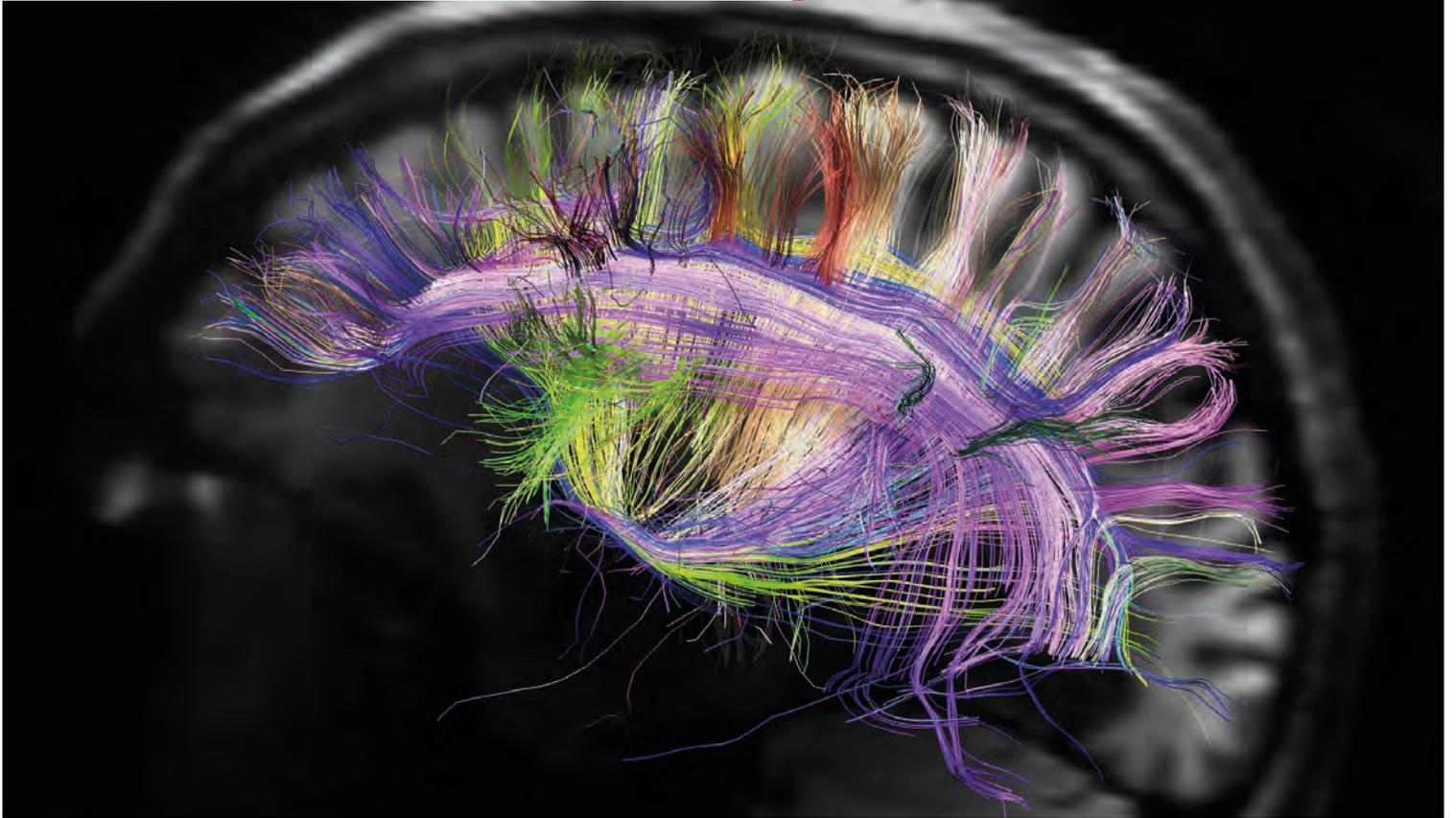
Livraison par la société D-Wave d'un ordinateur supraconducteur différent des processeurs discutés, qui résout des problèmes d'optimisation, mais dont l'accélération quantique n'a pas été démontrée.

2012

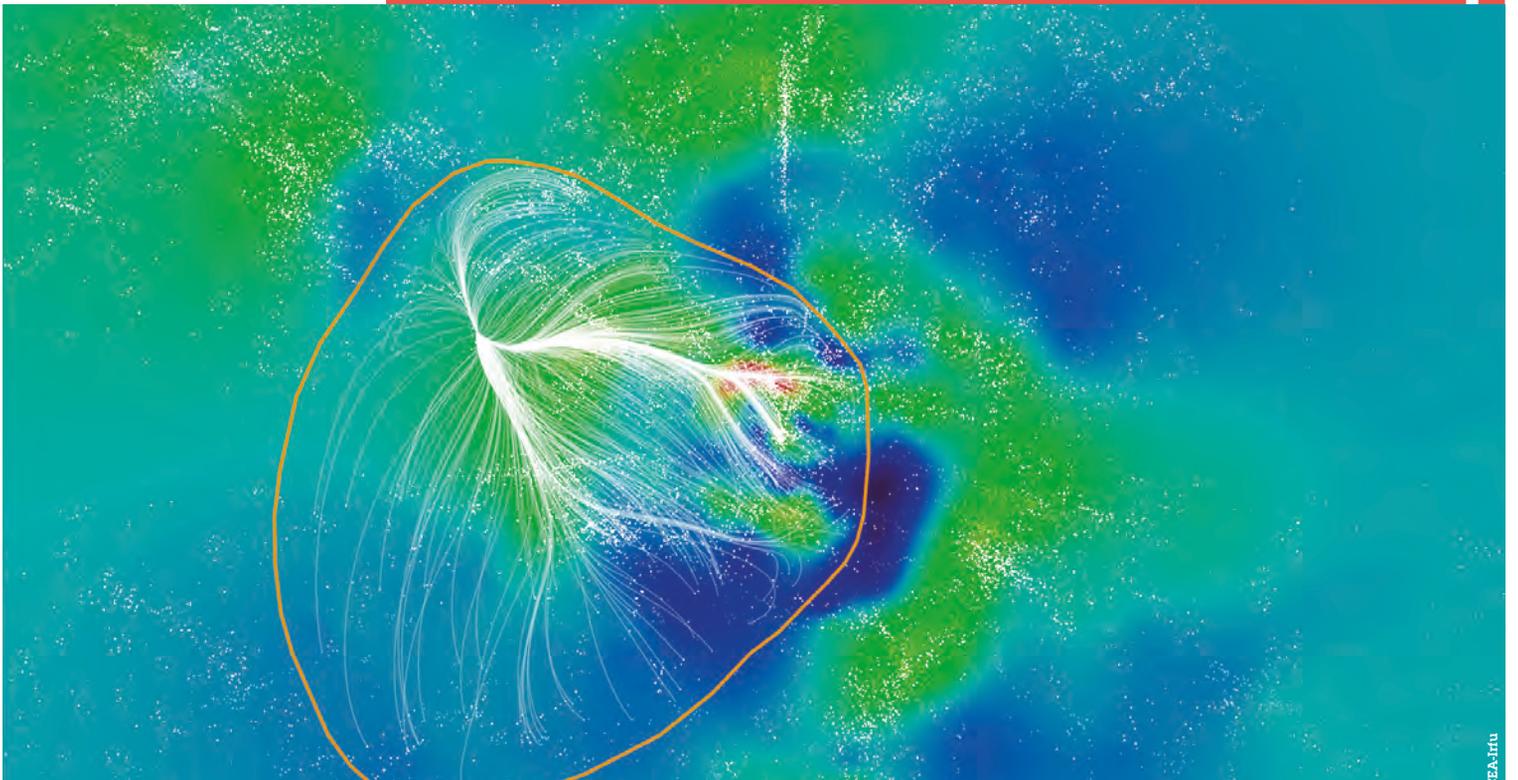
Mise en œuvre, par l'Université de Santa Barbara (USA) et le CEA, des algorithmes de Shor et de Grover dans des processeurs quantiques élémentaires, apportant la preuve de leur accélération quantique.

Avec 80 à 100 milliards de neurones, le cerveau humain est considéré comme le système le plus complexe de l'Univers. Un territoire qu'explorent les membres du projet international Human Brain Project, dont le CEA-I²BM qui dispose d'équipements de pointe en imagerie cérébrale au sein de son centre NeuroSpin.

© HBP



De l'infiniment petit à l'infiniment grand



500 millions d'années-lumière : c'est la taille du supercontinent extragalactique, Laniakea, abritant 100 000 grandes galaxies, dont la Voie lactée. Il a été découvert, fin 2014, par une collaboration internationale menée par l'Institut de physique nucléaire et impliquant le CEA-Irfu qui a notamment réalisé cette visualisation.

© SDvision/CEA-Irfu

