

Les défis

LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE
#244 – JUILLET / AOÛT 2021

du cea

DOSSIER

Matériaux critiques

p. 17

Making-of
Mini-cerveaux
en laboratoire
p. 13

Regards croisés
Mike Horn
au Dakar !
p. 30





L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

Les matières premières des transitions énergétiques et numériques deviennent critiques ? Substituons, réduisons, recyclons ! Quels modèles pour mieux comprendre nos maladies et identifier leurs traitements ? Explorons de nouveaux systèmes, comme les organoïdes, ces mini-organes 3D de laboratoire ! Le sport automobile se perd dans son nuage de gaz à effet de serre ? Changeons de braquet et misons sur l'hydrogène ! À l'affût des alternatives, douter, prendre des risques et s'engager. Ainsi la science progresse-t-elle, au service de tous.



WWW.CEA.FR

Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019
Directrice de la publication Marie-Ange Folacci
Rédactrice en chef Aude Ganier
Rédactrice en chef adjointe Sylvie Rivière
Ont contribué à ce numéro Cécile Michaut, Vahé Ter Minassian
Comité éditorial Claire Abou, Luc Barbier, Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin, Frédérique Taenet, Anne Orliac, Valérie Vandenberghe
Iconographie Micheline Bayard
Illustrations Jeremy Perrodeau (couverture, p. 27-29), Marta Signori (p. 2, 30)
Conception et réalisation graphique, secrétariat de rédaction Atelier Marge Design
 N° ISSN 1163-619X.
 Tous droits de reproduction réservés.
 Papier Arctic Volume White FSC. Stipa, Juillet 2021.

SOMMAIRE #244

EURÉKA

03 Covid-19

Le microbiote intestinal altéré

04 Fusion nucléaire

Un airbag de deutérium

05 Détection

L'imageur qui se réveille tout seul

06 Patrimoine

Autopsie en labo

08 Récupération d'énergie

On/Off sans fil ni pile

09 Covid-19

Nouveau mode de transmission

09 Logiciels

De l'IA pour la ponctualité du métro

10 Biotechnologies

Des micronageurs messagers

11 Imagerie

L'Atlas du tronc cérébral humain

12 Optoélectronique quantique

La source de photon unique sur silicium

MAKING-OF

13 Mini-cerveaux en laboratoire

AGORA

32 3 concours, 6 lauréats CEA

32 Visite européenne au TGCC

DOSSIER HIGH-TECH

Matériaux critiques



17 **Matériaux critiques : la riposte s'organise**

20 **Déchets électroniques, le défi des recycleurs**

21 **Le savoir-faire du nucléaire à la rescousse**

22 **Risques sur les batteries**

24 **Trouver la meilleure option avec l'ACV**
Entretien

26 **Aimants cherchent terres rares**



TOUT S'EXPLIQUE

27 **Smartphone, une mine urbaine**

33 **Premier Hackadem Sup'**

34 **Un véhicule expérimental autonome**

34 **Le CEA à Choose France**

REGARDS CROISÉS

30 **Rallye Dakar**

Cap vers l'hydrogène
Mike Horn et Johann Lejosne



LE COIN DES START-UP

35 **Isorg et ses capteurs d'empreintes digitales géants**

ABONNEMENT
GRATUIT SUR
bit.ly/abonnement-defis

ou en faisant parvenir par courrier
vos nom, prénom, adresse, profession
et tranche d'âge à :

Les Défis du CEA - Abonnements
CEA - Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette

EURÊKA L'ACTU DES LABOS

COVID-19

Le microbiote intestinal altéré

La liste des effets de la Covid-19 ne cesse de s'allonger. Au-delà de ceux déjà identifiés, il semblerait que la maladie altère durablement notre microbiote intestinal, un allié pourtant indispensable à notre santé.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

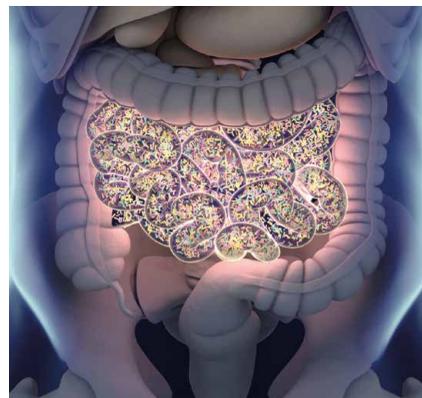
Entre 1 000 et 100 000 milliards de micro-organismes – principalement des bactéries, mais aussi des virus, parasites et champignons – peuplent notre intestin. Ce microbiote, avec lequel nous vivons en parfaite harmonie, est même essentiel à notre survie. Il nous aide à digérer (en libérant notamment des acides gras à chaîne courte, petites molécules aux multiples fonctions), nous protège contre les micro-organismes pathogènes, aide au bon fonctionnement du système immunitaire, etc. Toutes sortes de facteurs peuvent cependant le déséquilibrer ou l'altérer, avec des conséquences allant jusqu'au développement de pathologies : maladies inflammatoires, allergies, désordres neuropsychiatriques, cancers...

Perturbation persistante

Qu'en est-il lorsque nous subissons une infection par le SARS-CoV-2, virus responsable de la Covid-19? Une équipe de chercheurs de l'institut Pasteur de Lille, à laquelle s'est associée le CEA-Jacob, s'est penchée sur la question. « *Nous avons suivi l'évolution du microbiote intestinal sur un modèle animal, le primate, représentatif de formes légères à modérées de la Covid-19, et ce pendant les trois premières semaines de l'infection* », indique Vanessa Contreras,

chercheuse au CEA-Jacob. Comment? En collectant et analysant les ADN bactériens et les métabolites présents dans les matières fécales. Verdict : non seulement le SARS-CoV-2 modifie la composition du microbiote, mais cet état persiste bien après l'élimination du virus. « *Au bout de dix jours, dans ces formes non graves de la Covid-19, il n'y a pratiquement plus de virus dans le système respiratoire. Mais c'est à partir de là qu'on observe les plus grosses dysbioses intestinales : surreprésentation de certaines espèces bactériennes, baisse des acides gras à chaîne courte notamment.* »

Les scientifiques font alors l'hypothèse que cette dysbiose pourrait être impliquée dans la phase aiguë de la Covid-19 et participer à ses effets à long terme. « *Nous devons encore comprendre comment surviennent ces dysbioses, et aussi trouver des parades pour rééquilibrer le microbiote le temps de l'infection. Par exemple via une complémentation alimentaire ou à l'aide de probiotiques.* » ●



« Au bout de dix jours, dans les formes non graves de la Covid-19, il n'y a pratiquement plus de virus dans le système respiratoire. Mais c'est à partir de là qu'on observe les plus grosses dysbioses intestinales. »

Vanessa Contreras,
chercheuse au CEA-Jacob

LEXIQUE

Métabolite

Petite molécule (sucre, lipide, etc.) se formant au cours du métabolisme.

Dysbiose

Déséquilibre ou altération du microbiote.

← Ci-contre

Entre 1 000 et 100 000 milliards de micro-organismes peuplent notre intestin.

CEA-Jacob

Institut de biologie François-Jacob
(Fontenay-aux-Roses).

FUSION NUCLÉAIRE

Un airbag de deutérium

Comment protéger les structures internes d'un tokamak, des disruptions d'un plasma de fusion engendrant des électrons très énergétiques ? L'ajout massif de deutérium dans le réacteur serait une solution, que confirment plusieurs expériences pilotées par le CEA-Irfm sur le tokamak européen Jet, en collaboration avec Eurofusion, Iter et des partenaires américains. PAR AUDE GANIER

Pour obtenir des réactions de fusion nucléaire, il faut non seulement porter à quelques millions de degrés des isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium) dans un tokamak, mais aussi maintenir le plasma résultant à distance des parois du réacteur en le confinant grâce à des champs magnétiques.

Il existe cependant des instabilités qui peuvent conduire à la disparition rapide du plasma, appelée disruption. Dans certains cas, dans les instants suivant cette disruption, des électrons dits « découplés » s'échappent du plasma à des vitesses proches de celle de la lumière, entraînant d'autres électrons dans leur sillage dans un processus d'avalanche. Or, la vitesse à laquelle se développe cette avalanche croît exponentiellement avec la taille du tokamak. Dans la future expérience internationale Iter, ces électrons pourraient déposer sur une surface extrêmement petite presque autant d'énergie (de l'ordre de la centaine de mégajoules) que ce que contient le plasma de fusion lui-même !

Perturber les électrons découplés

« L'une des pistes envisagées par la communauté pour contrer ce problème majeur est d'essayer de générer des disruptions ne produisant pas d'électrons découplés. Mais, dans le cas où ceux-ci seraient quand même produits, nous cherchons à mettre au point une seconde ligne de défense en nous attaquant directement à eux », indique Cédric Reux, ingénieur au CEA-Irfm. En 2018, au cours d'une expérience unique sur le tokamak américain DIII-D, des physiciens avaient observé qu'une injection importante de deutérium pouvait dissiper très rapidement l'énergie des électrons découplés. Cette piste fut approfondie et confirmée à l'issue de plusieurs expériences sur le tokamak Jet, en Grande-Bretagne en 2019 et 2020. Les scientifiques montrent en effet qu'une dissipation de l'énergie des électrons découplés est possible, sans aucun dépôt de chaleur mesurable sur les composants internes du réacteur. Elle consiste à injecter massivement du deutérium sous forme d'éclats de glaçons, juste après la disruption.

Processus physiques à l'œuvre

« Des simulations numériques nous ont permis de comprendre les processus physiques à l'œuvre : les atomes de deutérium augmentent l'instabilité du faisceau d'électrons découplés, ce qui favorise l'étalement du dépôt d'énergie. Ils chassent hors du plasma les impuretés qui participent à la ré-accélération des électrons », explique le spécialiste. ●

LEXIQUE

Tokamak

Dispositif de confinement magnétique expérimental explorant la physique des plasmas et les possibilités de produire de l'énergie par fusion nucléaire.



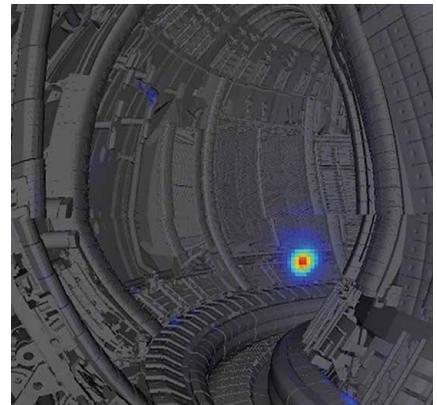
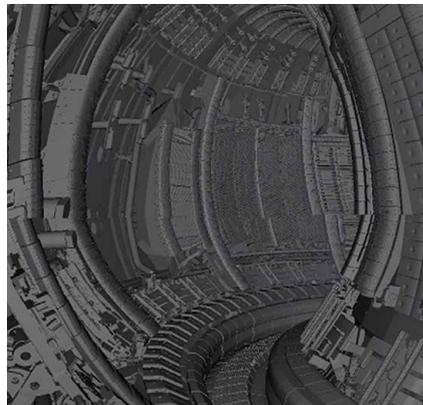
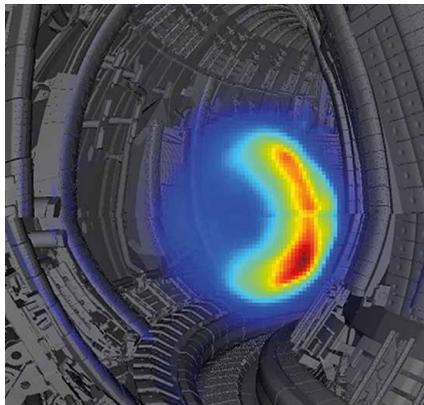
CEA-Irfm

Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (Cadarache).



CI-dessous

Émission d'électrons découplés vue en infrarouge dans le tokamak Jet.



DÉTECTION

L'imageur qui se réveille tout seul



© CEA



Ci-dessus

Le capteur μ Wai, au centre de la carte électronique de l'imageur.



CEA-Leti

Institut des micro et nano-technologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

Proposer plus de fonctionnalités sur des appareils nomades, telle la détection d'objets ou la reconnaissance faciale, implique qu'ils consomment peu. C'est pour lever ce verrou que les chercheurs des instituts Leti et List développent la première architecture d'un imageur autonome. L'innovation réside dans un système de réveil qui ouvre la voie vers de nouveaux usages en totale autonomie d'énergie.

PAR AUDE GANIER

Imaginez. Posé sur une table, votre smartphone se débloque automatiquement dès que vous passez dans le champ de vision de sa caméra, sans la moindre action de votre part... et sans vider la batterie de façon prématurée ! Cette fonctionnalité est celle développée conjointement par les instituts Leti et List du CEA pour les besoins de STMicroelectronics.

Une veille active intelligente...

À peine plus gros qu'une pièce d'un euro, l'imageur μ Wai intègre une architecture inno-

vante de lecture et de traitement d'images pour la détection d'objets. Le capteur permet une veille active intelligente : du fait de sa très faible consommation, il peut fonctionner en continu pour détecter un mouvement et identifier une forme, comme une silhouette ou un visage, apprise par de simples méthodes d'intelligence artificielle. Autonome, il règle lui-même ses paramètres d'acquisition de données en fonction de la scène et « décide », si nécessaire, de réveiller le système hôte pour une analyse plus fine de l'objet détecté. « Cette architecture revisite les méthodes classiques d'acquisition en proposant une représentation du signal qui simplifie l'implémentation des opérateurs de calculs tout en restant compatible avec les pixels de l'imageur développés par STMicroelectronics pour ses produits », indique Arnaud Verdant, ingénieur du CEA-Leti.

... et un système de réveil pour des analyses poussées

« Ces fonctionnalités de détection et de reconnaissance permettent une prise de décision, comme l'activation d'un smartphone ou d'un interrupteur sans contact, très fiable pour quelques dizaines de picojoules par pixel seulement », explique William Guicquero du CEA-Leti. Cette approche de réveil permet à l'imageur d'être très économe en énergie : tandis que la mise en œuvre standard d'une caméra et de son processeur consomment jusqu'à 10 000 microwatts pour ce genre d'opération, μ Wai n'en consomme que 10 !

La collaboration du CEA et de STMicroelectronics se poursuit tant les évolutions possibles du capteur et les applications envisagées sont considérables : détection de chute de personnes âgées, démarrage sans contact des appareils ménagers, équipements de sport et de divertissement... ou encore, comptage des personnes dans des espaces, déclenchement d'alarmes d'intrusion, identification du conducteur et déverrouillage intelligent des automobiles. ●

PATRIMOINE

Autopsie en labo

C'est un trésor archéologique inestimable que le laboratoire ARC-Nucléart a accueilli fin 2020 : la dépouille habillée d'un haut personnage religieux du Moyen Âge, quasi intacte. Au programme, stabilisation et conditionnement des différents matériaux et premières analyses.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

On a retrouvé Aubry de Braine, mort il y a plus de 800 ans. La scène se situe près de Soissons, dans les ruines de l'ancienne abbaye royale de Saint-Médard. Le chantier de fouilles entrepris à proximité de la crypte met à nu en juin 2019 une dalle funéraire. Elle porte une inscription en latin, mentionnant clairement l'abbé Aubry de Braine et sa date de décès : « *Au troisième jour de mai, la lumière t'a ravi, alors que courait depuis 1206 ans l'ère du Tout Puissant.* » Le personnage est connu

des historiens. L'homme, cité dans les textes de l'abbaye, fut en effet l'un de ceux qui dirigea ce haut lieu religieux fondé au VI^e siècle par Clotaire I^{er}, dernier fils de Clovis. Sous la dalle, la fouille révèle une tombe en pierres maçonnées.

Un manteau tissé de fils d'or

L'ouverture du caveau est organisée le 28 octobre 2020. À l'intérieur apparaît un corps dans un état de conservation exceptionnel. Posé sur une feuille de plomb, le défunt tient dans ses mains la hampe en bois de sa crosse d'abbé et gît dans un ample manteau, sur lequel on peut encore voir une bordure tissée de fils d'or. Il porte bottines en cuir et chaussees de laine. Les archéologues comprennent que la découverte est majeure. Le caveau est alors immédiatement refermé pour protéger son contenu. Et la décision est prise : le trésor sera confié aux spécialistes du laboratoire ARC-Nucléart pour diriger la dépose de la sépulture et entreprendre

les traitements pour sa conservation (*voir focus*). « *Le prélèvement de la dépouille, réalisé le 15 décembre 2020, a été un travail très délicat. Avec l'équipe en place, nous l'avons extraite et installée dans un film thermosoudé, étanche à l'oxygène, puis dans son caisson de transport* », raconte Laure Meunier, restauratrice-conservatrice à ARC-Nucléart.

Préserver grâce aux rayons gamma

À peine arrivé à Grenoble, le précieux colis est immédiatement envoyé dans la cellule d'irradiation gamma, pour une exposition à très forte dose pendant un peu plus de 24 heures, détruisant toute trace de champignons et bactéries. « *L'objectif est double : empêcher la décomposition des matières organiques, mais aussi protéger les personnels de tout risque biologique.* » Les mois qui suivent sont consacrés à la préparation de l'étape 2, celle de la fouille en laboratoire. « *Nous avons été mandatés pour séparer et préparer les différents matériaux*



constitutifs de la sépulture », précise Laure Meunier. Une équipe pluridisciplinaire est donc constituée : archéologues, anthropologue et restauratrice de tissus, associant les experts d'ARC-Nucléart.

Spécialiste des bois et cuirs

Le 19 avril 2021, tout est prêt et la fouille peut commencer. Elle durera trois semaines. « *Les tissus étaient mouillés et très fragiles. Des essais ont été nécessaires afin de mettre au point le meilleur protocole de prélèvement.* » Ajoutons à cela la particularité du chantier, liée à la très grande quantité de plomb pulvérulent présent. « *Nous avons été accompagnés par les experts en sécurité et santé du CEA pour gérer le risque plomb* », indique la restauratrice. Pour toute l'équipe, les EPI (équipements de protection individuelle) sont donc de rigueur, avec combinaison, surchausses, lunettes, gants et masque, et un suivi sanitaire est assuré.

Les chercheurs notent la présence de végé-



« Le prélèvement de la dépouille a été un travail très délicat. Nous l'avons extraite et installée dans un film thermosoudé, étanche à l'oxygène, puis dans son caisson de transport. »

Laure Meunier,

restauratrice-conservatrice à ARC-Nucléart

taux, notamment sous le corps du défunt, signes d'une préparation de la sépulture. Et décrivent la qualité et la finesse des décors du vêtement funéraire, que Laure Meunier qualifie de « *plus grand ensemble de soieries du XIII^e siècle* ». Patiemment, les différents éléments sont prélevés, séchés, conditionnés, puis envoyés au Centre de conservation du patrimoine du Service archéologique départemental de l'Aisne à Laon, en attendant que d'autres experts prennent le relais. Les bois et cuirs, à savoir la hampe et les chaussures, resteront encore un moment au sein d'ARC-Nucléart. « *Le traitement de ces matériaux, c'est notre spécialité. Pendant près de huit mois, les objets seront placés dans des bains de polyéthylène glycol, qui petit à petit consolidera la matière restante, puis seront séchés par lyophilisation avant envoi à Laon.* »

L'étude du squelette revient quant à elle à l'anthropologue, qui tentera notamment de déterminer les causes du décès. Le crâne par exemple est en très mauvais état, comme aplati. Ces premières fouilles ne sont que le début de l'enquête. Des années d'analyses attendent encore les experts, avant que la tombe de l'abbé de Saint-Médard ne révèle tous ses secrets. ●

FOCUS

ARC-Nucléart

Hébergé sur le site du CEA Grenoble, ARC-Nucléart est un atelier-laboratoire dédié à la conservation et à la restauration des objets du patrimoine en bois ou cuir, notamment de grandes dimensions. Il intervient sur les collections des musées ou dans les monuments historiques, et sur les chantiers de fouilles pour assister les archéologues. Le GIP ARC-Nucléart est soutenu par ses membres (CEA, ministère de la Culture, ville de Grenoble, association ProNucléart) et ses partenaires (région Auvergne – Rhône-Alpes, Conseil départemental de l'Isère, Albingia et Fondation de la maison de la chimie).



Ci-contre, à gauche

Ouverture de la sépulture au laboratoire ARC-Nucléart.



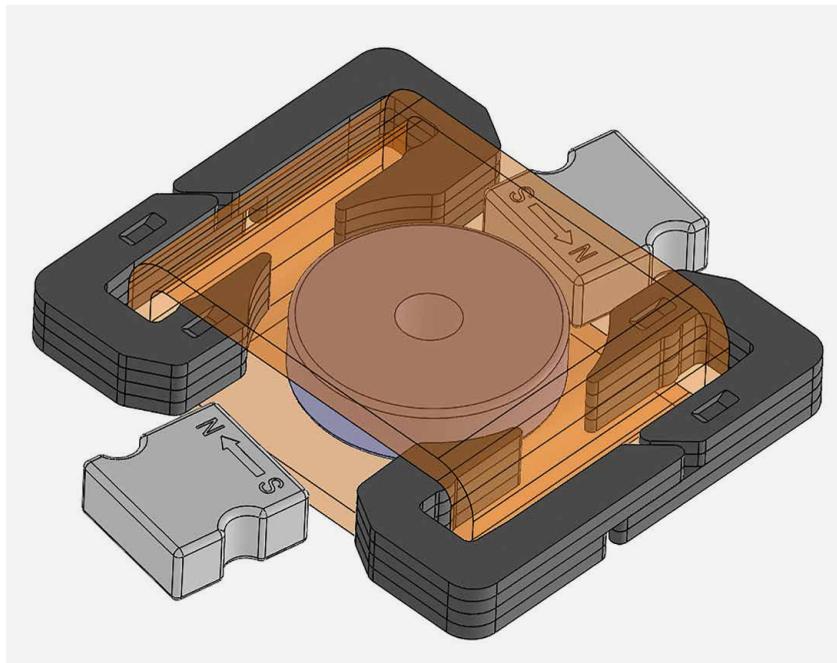
Ci-contre, à droite

Semelle de chaussure droite en cuir et nettoyage de la chaussure en étoffe de laine feutrée.

RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

On/Off sans fil ni pile

© S. Boisseau et al., Smart Mater. Struct. 30 (2021)



↑
Ci-dessus
Détail du mécanisme de l'interrupteur. Les deux crochets gris sont les aimants.

📍
CEA-Leti
Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

📍
CEA-Liten
Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).

Le CEA et l'industriel Legrand ont uni leurs expertises pour développer une nouvelle génération d'interrupteurs sans fil et sans pile.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Les meilleures idées naissent parfois autour d'un café. Ou, plus original, dans un hall d'aéroport. C'est ainsi que débute en 2016 une collaboration entre Legrand, spécialiste mondial des infrastructures électriques et numériques du bâtiment, et le CEA, à la faveur d'une rencontre entre un directeur d'usine et un scientifique. Objet de la discussion ? Des interrupteurs sans fil, mais surtout sans pile, à base de récupération d'énergie, que Legrand souhaite développer. Une technologie sur laquelle travaille justement le CEA. L'objectif est de disposer de solutions plus performantes que l'état de l'art.

Fabrication de grande précision

Trois ans plus tard, le CEA, *via* ses instituts Leti et Liten, rend sa copie. « *C'est aujourd'hui*

le produit le plus performant au monde », annonce Sébastien Boisseau, le chef du projet au CEA. L'énergie est générée par un simple appui de doigt sur l'interrupteur. À l'intérieur, un système de récupération d'énergie électromagnétique, avec aimants rotatifs et bobine de cuivre, génère un courant électrique à la manière d'une dynamo de vélo sophistiquée. De quoi alimenter la liaison radio (sans fil) entre l'interrupteur et l'objet piloté (ampoule, volet, etc.).

« *Toute la difficulté a été de transformer un mouvement à très basse vitesse, celui d'un doigt, en un mouvement à haute vitesse, celui de l'aimant, pour que le système soit efficace. Contrainte supplémentaire : le rendu tactile et acoustique devait être le plus proche possible de celui d'un interrupteur standard* », poursuit-il. Pour concevoir l'ensemble, l'équipe va réaliser des centaines de simulations, à la fois mécaniques et électromagnétiques. « *Au final, le dispositif est assez complexe, avec une trentaine de pièces centimétriques usinées à une centaine de microns près, pour un prix comparable aux interrupteurs à piles.* »

L'impact environnemental réduit

Le pari qui consistait à proposer une solution concurrentielle est donc relevé. Côté usages, le produit est aussi fin qu'un interrupteur classique (un argument esthétique important pour le consommateur) et nécessite une force d'appui minimale. Un même générateur d'énergie permet en outre d'alimenter quatre touches opérationnelles par interrupteur. « *Le marché principal est celui de la rénovation et de la gestion des grands parcs immobiliers. Mais le produit peut également intéresser les particuliers* », explique Sébastien Boisseau. L'ajout ou le déplacement d'un nouvel interrupteur est ainsi facilité, moyennant l'installation d'un récepteur radio sur l'objet à commander : pas de câble électrique à tirer, ni de tranchée à faire dans le mur. C'est aussi la fin de la maintenance liée au changement des piles et de la gestion des piles usagées. Gain environnemental assuré! ●

COVID-19

Nouveau mode de transmission

Les connaissances sur le coronavirus SARS-CoV-2 continuent de progresser. Une nouvelle voie d'entrée vient d'être découverte, impliquant des récepteurs situés sur les cellules immunitaires. PAR SYLVIE RIVIÈRE

Pour pénétrer et infecter les cellules humaines, le virus SARS-CoV-2, responsable de la Covid-19, dispose d'une clé. C'est la protéine Spike, capable de s'accrocher à la protéine ACE2. Présente à la surface de nos cellules, ACE2 est notamment impliquée dans la régulation de la tension artérielle.

La piste des lectines

Une équipe associant des chercheurs de l'Institut de biologie structurale (CNRS/CEA/UGA) vient de découvrir d'autres récepteurs humains de la Spike : des protéines de la famille des lectines, que l'on retrouve sur les cellules du système immunitaire. Les liaisons, une fois établies, favorisent le transfert du virus aux cellules possédant le récepteur ACE2. Ce type de

mécanisme complémentaire, bien connu chez d'autres virus, permet au micro-organisme d'augmenter son pouvoir infectieux. L'équipe a aussi trouvé comment perturber cette action, grâce à un composé « glyco-mimétique » mimant les sucres de la protéine Spike. Disposer de tels leurreurs est une aubaine pour les chercheurs : ces outils vont en effet leur permettre d'étudier plus facilement l'implication des liaisons Spike-lectine dans la capacité infectieuse du SARS-CoV-2. ●

LEXIQUE

Lectine

Protéine membranaire se liant spécifiquement aux glucides.



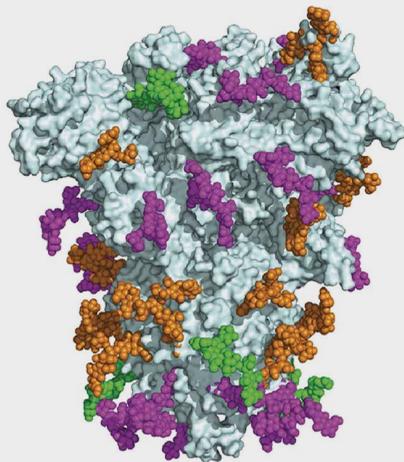
CEA-Irig

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.



Ci-dessous

Représentation de la protéine Spike, avec ses sucres illustrés en couleur. Chaque couleur indique une reconnaissance par des récepteurs lectines de spécificités différentes.



LOGICIELS

De l'IA pour la ponctualité du métro

Prévenir les interruptions de service dans le métro parisien grâce à l'intelligence artificielle, c'est possible ! Les outils logiciels conçus par le CEA avec la RATP contribuent à automatiser la supervision des équipements, détecter les anomalies et identifier des précurseurs de pannes.

PAR AUDE GANIER

La ponctualité des métros parisiens repose sur une gestion du trafic réglée comme du papier à musique. Chaque ligne de métro est équipée de milliers d'équipements alimentant la salle de contrôle en données variées, qui sont analysées par le système de supervision. En s'appuyant sur l'expertise des équipes de maintenance de la RATP, les chercheurs en IA et *big data* du CEA-List ont conçu des outils logiciels capables de caractériser l'état de ce système et de prédire son évolution. Une première évaluation du prototype a eu lieu à partir des données fournies par la RATP sur trois années de trafic. Résultat : 90 % des pannes éti-quetées ont été détectées, avec une anticipation de quelques heures. Ces nouveaux outils, créés en co-innovation avec la RATP, pourraient être mis à disposition des équipes, *via* une interface web, pour une maintenance optimisée voire prédictive. Afin, au final, d'offrir aux voyageurs un service en constante amélioration. ●



CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

BIOTECHNOLOGIES

Des micronageurs messagers

Imaginons des armées de microdispositifs à même, une fois injectées dans le corps d'un patient, de traiter individuellement les cellules infectées par des maladies comme le cancer. Le jour où leur déplacement sera suffisamment contrôlé pour cibler précisément les cellules, ces « micronageurs » promettent de révolutionner la médecine. Un défi qui motive plusieurs équipes de par le monde, dont celle de Damien Faivre au CEA-Biam.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Au royaume des lilliputiens, la locomotion aquatique obéit à des règles de navigation bien différentes de celles de notre monde de géants. Les bactéries, par exemple, mettent en œuvre différentes stratégies, parfois contre-intuitives, pour se déplacer. L'une des plus connues fait appel à des flagelles dont les mouvements rotatifs assurent la propulsion des micro-organismes dans l'eau. C'est en s'en inspirant que plusieurs laboratoires sont parvenus à développer une première génération de micronageurs d'allure hélicoïdale. « Contrôlés par l'intermédiaire d'un champ magnétique rotatif qui agit sur l'hélice, elle-même dotée d'un champ magnétique perpendiculaire à son axe, ces systèmes ont toutefois un nombre de degrés de liberté trop limité », expose Damien Faivre.

Pilotage magnétique

D'où l'idée d'identifier des formes plus adaptées à l'application visée et à les reproduire par des moyens artificiels. Pour ce faire, les chercheurs ont imaginé un protocole expérimental en trois temps. Pour commencer, ils ont synthétisé par voie chimique des poudres de magnétite contenant des nuées d'agrégats d'oxyde de fer selon plusieurs configurations. Le com-

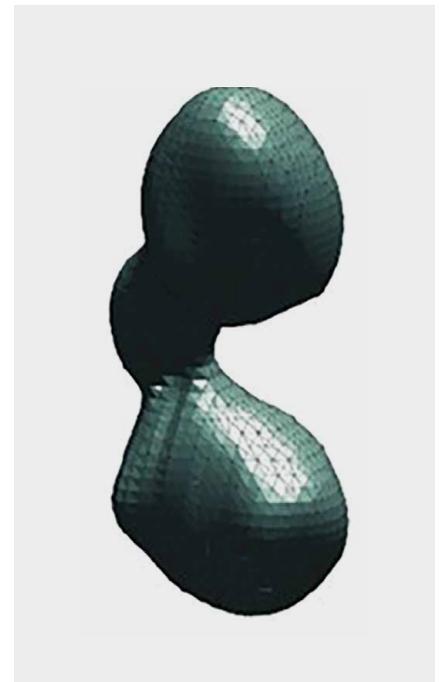
portement de ces différents micro-amas métalliques, soumis à un champ magnétique de fréquence de rotation variable, a ensuite été étudié. Et ces analyses ont permis de sélectionner les architectures les plus pertinentes, pour en réaliser des versions numériques permettant de les produire par impression 3D.

Des architectures prometteuses

Au terme de la première partie de ces travaux, les chercheurs ont découvert des formes prometteuses. L'une, à l'allure de banane, permet aux agrégats de magnétite de nager à toute allure. Une autre autoriserait la possibilité de contrôler leur direction : « si la vitesse de rotation du champ magnétique est par exemple de 20 tours par seconde, l'amas file dans une direction à 2 micromètres par seconde ; mais si elle est poussée à 70 tr/s., il se déplace dans l'autre sens à 3 $\mu\text{m/s}$. », illustre Damien Faivre. Et il ne s'agissait là que de simples observa-

« Des calculs ont démontré qu'en théorie, un couplage entre un moment magnétique et une architecture en particulier pourrait permettre de déplacer des micronageurs jusqu'à dix fois plus rapidement ».

Damien Faivre,
directeur du CEA-Biam



© CEA

tions. « Par la suite, des calculs ont démontré qu'en théorie, un couplage entre un moment magnétique et une architecture en particulier pourrait permettre de déplacer des micronageurs jusqu'à dix fois plus rapidement. »

De la complexe reproductibilité

S'est ensuite posée la question de leur fabrication en série, avec des performances reproductibles. Les chimistes pensaient au départ recourir à l'impression 3D. Il s'agissait d'assembler des nanobilles de plastique en des micronageurs de la forme désirée, puis de leur donner un moment magnétique par dépôt d'une couche métallique. Mais, aux termes de nombreux essais, ce procédé de fabrication additive s'est révélé d'une précision insuffisante : les spécimens créés ne présentaient que trop rarement les mêmes qualités de nage que l'original d'oxyde de fer. « De plus, faire appel à cette technique suppose d'enrober les micro-



L'image

nageurs en plastique d'une couche de nickel afin de leur conférer une sensibilité aux champs magnétiques. Or, nos tests ont montré que la vaporisation de ce métal modifie, elle aussi, la masse et la forme de ces objets qui sont susceptibles de s'oxyder. »

Une alternative bio-inspirée

Une autre piste s'inspirant des bactéries magnétotactiques représente un motif d'espoir. Dans la nature, ces micro-organismes utilisent le champ magnétique terrestre pour lutter contre les courants et se maintenir sur les fonds sous-marins. Ils peuvent, eux aussi, être guidés à travers le corps humain grâce à des chaînes de magnétosomes. De quoi devenir une source d'inspiration pour les chercheurs. ●

LEXIQUE

Flagelle

Filament mobile, unique ou multiple, fixé à la surface de nombreuses cellules.

Magnétotactique

Sensible aux lignes de champ magnétiques.

Magnétosome

Organite capable de percevoir le champ magnétique et de coordonner ses mouvements en fonction.



Ci-contre

Ce micronageur rappelant une forme de banane permet aux agrégats de magnétite de nager à toute allure.



CEA-Blam
Institut de biosciences
et biotechnologies d'Aix-Marseille



© The Brainstems Atlas

IMAGERIE

L'atlas du tronc cérébral humain

Ceci est un tronc cérébral humain. Du moins une vue inédite extraite de son premier atlas anatomique en IRM à champ extrême, réalisé par des chercheurs du CEA-Joliot et de l'Inserm dans le cadre du grand programme européen *Human Brain Project*. Interactif, il est accessible à tous depuis Internet (*The Brainstems Atlas*).

Reptilien mais très complexe

Situé à la base du cerveau humain dans le prolongement de la moelle épinière, le tronc cérébral est impliqué dans de nombreuses fonctions reptiliennes (contrôle de la respiration et du rythme cardiaque, de la douleur, de l'équilibre, de la motricité) et dans des pathologies cérébrales induisant des troubles moteurs à l'instar de la maladie de Parkinson. Il est composé de plusieurs dizaines de noyaux dont la taille, extrêmement variable, peut parfois être inférieure au millimètre. La finesse de ses structures, son

mouvement permanent, rythmé par la pulsation du liquide cébrospinal, ainsi que son positionnement à proximité d'os remplis d'air, font du tronc cérébral l'une des régions les plus complexes à cartographier en IRM.

Une résolution mésoscopique

Pour relever ce défi, plusieurs tronc cérébraux prélevés *ex vivo* (*post mortem*) ont été scannés sur l'IRM pré-clinique à 11,7 teslas de la plateforme NeuroSpin. Et cela, grâce à un protocole d'imagerie permettant l'acquisition de données anatomiques de très haute résolution (100 micromètres) et de données de diffusion mésoscopiques (300 micromètres). L'atlas servira à la fois aux neuroanatomistes pour l'enseignement et aux neurochirurgiens pour guider leurs actes, que ce soit en oncologie ou lors de l'implantation de dispositifs pour le traitement de la maladie de Parkinson.

→ fibratlas.univ-tours.fr/brainstems



CEA-Joliot
Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot (Orsay).

OPTOÉLECTRONIQUE QUANTIQUE

La source de photon unique sur silicium

Des chercheurs du CEA-Irig et des universités de Montpellier et de Marseille obtiennent un atome artificiel qui émet dans le silicium des photons uniques. Cette première mondiale ouvre la voie à de nombreuses applications pour les technologies quantiques.

PAR AUDE GANIER

Un composant optoélectronique capable d'émettre dans une direction bien définie, chaque fois qu'on le désire, une impulsion lumineuse faite... d'un seul et unique photon ? Connus sous le nom de « source de photon unique », ce système fait l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires depuis une vingtaine d'années. Il n'avait jamais été réalisé sur du silicium, alors qu'il promet de nombreuses applications en cryptographie quantique, métrologie, simulation ou calcul quantique.

Des atomes artificiels

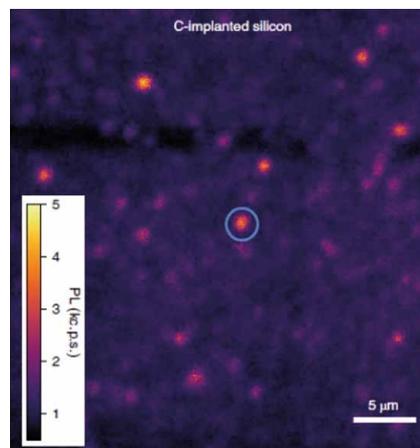
Comment produire un photon unique ? Les composants optoélectroniques usuels (diodes laser, diodes électroluminescentes) en sont incapables. Il a donc fallu inventer de nouvelles sources, en s'inspirant d'un système modèle, l'atome isolé. « *Lorsqu'il est excité, cet atome "à deux niveaux" émet un seul photon en se relaxant ; et n'émet un autre photon que s'il est excité à nouveau* », explique Jean-Michel Gérard du CEA-Irig. La communauté a étudié de nombreux systèmes solides, baptisés atomes artificiels, suffisamment petits pour que leurs états quantiques prennent des énergies discrètes, comme pour les états d'un atome isolé. L'un d'eux est la « boîte quantique », aujourd'hui commercialisée, qui donne de bonnes sources de photons uniques. Mais elle est inefficace lorsqu'elle est fabriquée à base de silicium ou germanium.

Un autre atome artificiel très étudié est un défaut ponctuel du diamant, le centre « NV ».

D'où l'idée des chercheurs d'aller regarder dans le tableau de Mendeleïev les voisins de cet élément carbone... pour y trouver, juste en dessous, le silicium. Ils ont ainsi décidé de considérer ses défauts ponctuels comme de potentiels atomes artificiels. Répertoriés depuis les années 60, ceux-ci n'avaient jamais été étudiés au niveau du défaut unique.

Le centre G du silicium

« *Notre étude a principalement porté sur le "centre G", défaut ponctuel constitué par deux atomes de carbone voisins associés à un atome interstitiel de silicium qui présente une raie d'émission à 1,28 μm , bien adaptée pour les communications sur fibre optique ou sur puce silicium* », indique le spécialiste. En implantant des atomes de carbone dans un substrat commercial de SOI (silicium sur isolant), ils ont fabriqué des défauts suffisamment espacés pour isoler la fluorescence de centres G isolés. Heureuse surprise : le centre G s'est révélé être une source de photons uniques très efficace ! Ce résultat ouvre la voie à l'intégration de ces sources au sein de circuits photoniques sur silicium, comme ceux du CEA-Leti, et bientôt au passage à l'échelle de la photonique quantique. ●



« Lorsqu'il est excité, l'atome isolé émet un seul photon en se relaxant ; et n'émet un autre photon que s'il est excité à nouveau. »

Jean-Michel Gérard, du CEA-Irig

← Ci-contre

Visualisation des centres G isolés, sources de photons uniques.



CEA-Leti

Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

CEA-Irig

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.

MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

Mini-cerveaux en laboratoire

Les organoïdes – ces mini-organes en 3D cultivés en laboratoire – représentent une révolution pour la recherche médicale. Apparus dans les années 2010, ils se comportent comme des tissus d'intestin, de cœur, de foie, de cerveau... Ces nouveaux outils sont un moyen inédit d'explorer le fonctionnement des organes, mais aussi les mécanismes conduisant à l'apparition et à l'évolution de maladies, de tester un grand nombre de molécules thérapeutiques,

voire d'envisager une médecine régénérative. Ils pourraient aussi limiter le recours aux animaux de laboratoire. À Fontenay-aux-Roses, les chercheurs du CEA-Jacob et de Sup'Biotech élaborent ainsi des mini-cerveaux pour mieux comprendre, diagnostiquer et soigner les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson, etc.).

→

REPORTAGE RÉALISÉ
PAR SYLVIE RIVIÈRE (TEXTE)
ET ROMAIN GUITTET (PHOTOS)





EN IMAGES

① Observation au microscope inversé à fluorescence d'une colonie de cellules pluripotentes induites (IPS), exprimant une protéine liée à une maladie neurodégénérative couplée à un marqueur fluorescent vert.

② Création de gouttelettes contenant les cellules souches : dépôt et retournement du couvercle sur la boîte de Pétri.

FOCUS

Les organoïdes ont encore des limites

La recherche continue pour optimiser le développement physiologique des mini-cerveaux. Réussir à les vasculariser permettrait par exemple d'accélérer leur développement et de diversifier leurs structures. Il est aussi question de mesurer et d'améliorer la connexion entre les différents types cellulaires coexistants dans l'organoïde, ou encore d'homogénéiser les organoïdes entre eux.



CEA-Jacob
Institut de biologie
François-Jacob
(Fontenay-aux-Roses).

①

Ingénierie cellulaire

« Par génie génétique, nous induisons dans nos mini-cerveaux la production de peptides neurotoxiques impliqués dans la maladie d'Alzheimer. »

Ambre Leleu, doctorante en génie génétique

Grâce au prix Nobel de médecine Shinya Yamanaka, on sait depuis 2007 reprogrammer toute cellule adulte pour la transformer en cellule souche pluripotente induite (IPS). Celle-ci sera capable de se différencier en n'importe quelle cellule du corps humain. Au CEA, les chercheurs fabriquent des cellules IPS à partir de cellules de peau. Comment ? En y introduisant des particules virales exprimant des gènes de reprogrammation. Ces cellules IPS sont ensuite modifiées à l'aide d'outils d'édition génétique pour exprimer des gènes impliqués dans des maladies neurodégénératives, et ainsi reproduire certaines de leurs caractéristiques physiopathologiques. Une autre voie consiste à utiliser des cellules (peau ou sang) d'un patient atteint d'une forme génétique de la maladie.

②

Différenciation

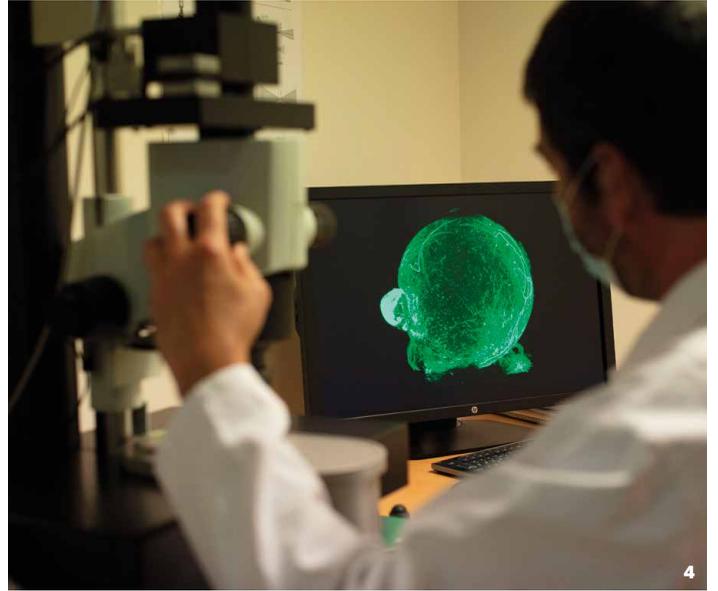
« En 2014, nous étions pionniers en France dans la biofabrication de mini-cerveaux. Cela nous a obligés à être inventifs. »

Frank Yates, enseignant-chercheur

Pour engager les cellules pluripotentes dans la voie de la différenciation, deux conditions sont nécessaires : agréger les cellules entre elles et utiliser un milieu de culture contenant un cocktail de molécules judicieusement sélectionnées pour induire l'obtention du type cellulaire recherché (ici des cellules cérébrales). Les petits amas d'IPS sont d'abord placés dans des gouttes pendantes, générant des forces d'étirement. Une à deux semaines plus tard, ils sont transférés dans une substance appelée hydrogel, sorte de support dans lequel ils pourront s'auto-organiser en 3D et croître. Puis ils sont soumis à une agitation mécanique qui oxygène et nourrit le tissu *in vivo*, mimant ainsi l'action des vaisseaux sanguins.



3



4

3

Organoïde en maturation

« Avec les mini-cerveaux, nous disposons d'un nouveau modèle pour étudier les phases très précoces de la maladie d'Alzheimer. »

Jean-Philippe Deslys,
médecin et directeur de recherche

Les cellules différenciées sont mises en croissance jusqu'à former des petites boules de 2 à 3 mm de diamètre. En deux mois, des tissus cérébraux complexes et fonctionnels vont se former, mélange de neurones, d'astrocytes, de cellules gliales. D'autres types de cellules peuvent même parfois apparaître, comme celles de la rétine ! À ce stade, les chercheurs peuvent, en modifiant les conditions de culture, accroître les caractéristiques physiopathologiques de la maladie, accélérer le vieillissement du mini-organe, ou même tester des stratégies thérapeutiques. Au-delà des mini-cerveaux, la science permet aujourd'hui de construire une grande variété d'organoïdes : organoïdes cardiaques qui battent comme un cœur, épiderme, mini-foie, intestin, etc.

4

Mise en lumière

« L'intérêt de la microscopie à feuillet de lumière, c'est de pouvoir imager un organoïde entier sans avoir à faire de coupes. »

Thomas Lemonnier, enseignant-chercheur

Pour étudier les organoïdes, les chercheurs utilisent notamment la microscopie à feuillet de lumière. Après avoir été marqués par des molécules fluorescentes ciblant les structures du tissu cérébral et les sites pathologiques, les organoïdes sont rendus transparents par clarification, une technique chimique s'étalant sur plusieurs jours à plusieurs semaines. Grâce à une fine feuille de lumière générée avec un laser, des tranches artificielles de l'organoïde sont observées. Un algorithme de reconstitution d'images restitue ensuite l'objet en 3D. Des fonctions proches de celles d'un cerveau adulte ont ainsi pu être mises en évidence, tout comme les signatures moléculaires les plus classiques de la progression de la maladie d'Alzheimer.

EN IMAGES

③ Les mini-cerveaux en culture peuvent vivre jusqu'à deux ans.

④ Sur l'écran, rendu 3D des neurones dans un organoïde cérébral à l'aide d'un microscope à feuillet de lumière.

FOCUS

Vers les organoïdes sur puce

Les chercheurs tentent aujourd'hui de construire des organoïdes sur puce. Les organes sur puce de première génération, intégrant des modèles biologiques plus simples, sont déjà une réalité au CEA. Ces systèmes miniaturisés mêlant microfluidique, électronique et biologie, consistent à installer des cellules humaines dans des mini-compartiments perfusés en continu pour reproduire la fonctionnalité d'un organe. Exemple : des îlots de Langerhans (cellules du pancréas) cultivés en microcanaux, mimant la sécrétion d'insuline. Cette fonctionnalité peut alors être suivie en continu grâce à un réseau de microcapteurs. Disposer d'organoïdes sur puce permettrait de se rapprocher davantage du fonctionnement complet d'un organe.



DOSSIER HIGH-TECH

Matériaux critiques : la riposte s'organise

PAR CÉCILE MICHAUT

Certains matériaux indispensables aux industries high-tech sont produits dans seulement quelques pays. Face aux risques de rupture d'approvisionnement ou d'explosion des prix, la science développe des solutions : substitution, réduction, recyclage.

2010, le monde occidental prend brusquement conscience de l'importance des matériaux critiques. Cette année-là, la Chine et le Japon connaissent un différend territorial à propos des îles Senkaku situées entre les deux pays. La Chine décrète alors un embargo sur l'exportation des terres rares vers le Japon qui voit son industrie high-tech fortement pénalisée. L'empire du Milieu décline ensuite cet embargo en quotas d'exportations vers le reste du monde, entraînant une forte hausse des prix. Et un douloureux réveil des pays touchés.

En réponse, le ministère français de l'Industrie crée en 2012 le Comité pour les métaux stratégiques (Comes), impliquant, entre autres, les organismes de recherche CEA, CNRS, BRGM et des industriels. Trois objectifs : sensibiliser les acteurs industriels et de la recherche sur les risques d'approvisionnement en matières premières ; valoriser les ressources primaires (extraites) et secondaires (recyclées) du territoire ; engager une diplomatie des matières premières.

Analyse de cycle de vie

Au CEA, cette problématique est abordée sous deux angles. D'une part, et dès la fin des années 2000, il cherche à anticiper les tensions au niveau des technologies actuelles et en développement, et conduit des analyses de cycle de vie de différents produits (*voir p. 24*). D'autre part, acteur majeur des transitions énergétique et numérique, il consacre une R&D importante sur des technologies moins gourmandes en matériaux critiques, dans une démarche d'économie circulaire. « *Il ne faut pas seulement s'intéresser au minerai, mais à toute la chaîne de production, depuis la mine jusqu'au lingot* », souligne Étienne Bouyer, chercheur à la Direction des programmes du CEA, siégeant par ailleurs au Comes et sollicité en 2019 sur ces questions par le ministère de la Transition écologique et solidaire (*voir focus*).

Terres rares, indium, cobalt...

Maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur : plus facile à dire qu'à faire. Dans le cas des terres rares par exemple, c'est la Chine qui →



© D. Guillaudin/CEA

« L'idée est de mettre le bon matériau en bonne quantité, au bon endroit, et qu'il soit facilement récupérable en fin de vie. »

Étienne Bouyer, chercheur à la Direction des programmes du CEA

pilote les prix. Lorsqu'après la crise de 2010, les Australiens et les Américains réouvrent des mines, le géant asiatique déverse ses stocks sur le marché, conduisant à un effondrement des prix... et à la fermeture des mines australiennes et américaines devenues non compétitives. Outre les terres rares, les principaux maté-

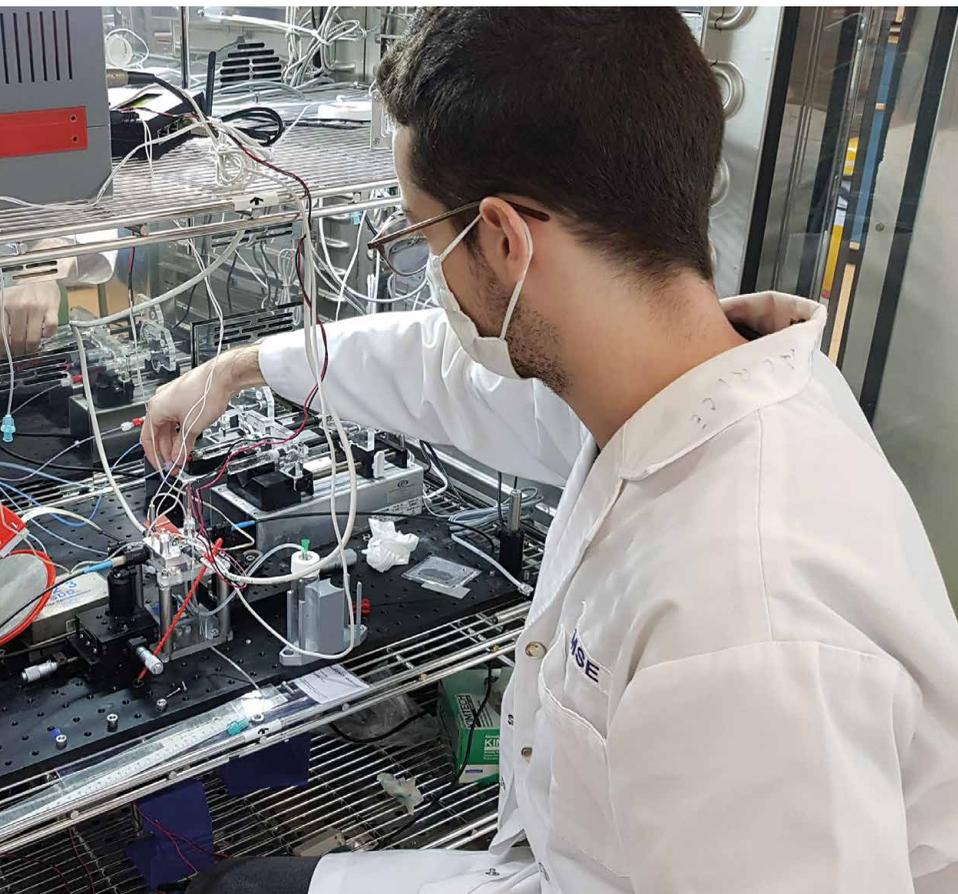
riaux critiques sont l'indium (utilisé dans les téléphones portables et les cellules photovoltaïques), le cobalt et le nickel (présent dans les batteries lithium-ion), le tungstène (pour la microélectronique et les outils de coupe au carbure de tungstène), et certains métaux nobles comme le platine (présents dans les piles à combustible) ou l'iridium (électrolyseurs). Quant au lithium, et bien qu'il figure dans la liste européenne des matériaux critiques qui en compte 45, il semble moins problématique. Il est en effet mieux réparti sur la planète et ses gisements se situent dans des pays assez stables (Chili, Bolivie, Argentine). Des mines pourraient également être ouvertes en Europe si nécessaire. Au-delà de cette liste, d'autres matériaux sont à surveiller, car produits dans des zones de conflits ou dans des régions où le travail des enfants est fréquent. De fait, les États-Unis ont promulgué une loi obligeant les entreprises opérant sur leur sol à déclarer la provenance des métaux qu'ils utilisent. L'Europe a fait de même. « Ces lois fonctionnent bien et poussent les industriels à être attentifs à leur chaîne d'approvision-



nement, observe Étienne Bouyer. Elles ont d'ailleurs engendré des règles interdisant le travail des enfants et incitant à la conception d'usines à l'impact environnemental maîtrisé, du moins limité ».

Substituer, réduire

« En 2021, la population mondiale atteint 7,8 milliards d'individus et la consommation de produits high-tech ne cesse d'augmenter. C'est pourquoi il est crucial de travailler, dès la conception des objets, à éviter ou limiter l'usage de ces matériaux critiques », indique Luc Aixala, chef du programme Économie circulaire à la Direction des énergies du CEA. Depuis une dizaine d'années, la recherche progresse en ce sens. Par exemple, les piles à combustible nécessitent de moins en moins de platine car elles en incorporent sous la forme de particules de plus en plus petites et à la réactivité meilleure, voire avec des nanobilles recouvertes de ce précieux métal. Les aimants permanents contiennent moins de terres rares qu'auparavant. « L'idée est de mettre le bon matériau en bonne quan-



© D. Guillaudim/CEA

tité, au bon endroit, et qu'il soit facilement récupérable en fin de vie», précise Étienne Bouyer. Dans cette optique, les technologies de fabrication additive, comme l'impression 3D, permettent de consommer moins de matière et de réduire les pertes lors de la fabrication.

Trouver des compromis

Côté substitution, un moteur électrique fonctionnant avec des aimants qui contiennent des terres rares peut être remplacé par un moteur à rotor bobiné, sans aimant. De même, une batterie lithium-ion à base de nickel, manganèse et cobalt (NMC) peut l'être par une batterie à base de phosphate de fer. Dans les deux cas cependant, les performances sont moindres. Mais faut-il toujours le nec plus ultra pour tous les usages? «*La problématique des matériaux critiques impose de trouver des compromis entre plusieurs contraintes*», souligne Fabien Perdu, ingénieur au CEA-Liten.

Favoriser le recyclage

L'enjeu est également de mieux récupérer

ces matériaux dans les objets existants. Cela implique de promouvoir des procédés de fabrication et d'usages qui réduisent les déchets, et d'optimiser la conception des objets pour en faciliter une seconde vie ou leur recyclage. Aujourd'hui, beaucoup ne sont pas conçus pour être facilement recyclés. «*Il faut une obligation légale, souligne l'expert. Par exemple, le recyclage des véhicules hors d'usage fonctionne car la loi impose que 85 % de la masse du véhicule soit recyclé ou réutilisé*». Mais la récupération des matériaux pour la réalisation de nouveaux objets a un coût énergétique important. Surtout, et quels que soient les efforts de recyclage, il ne sera pas possible de couvrir la totalité de la demande en matériaux critiques.

Cette problématique interroge directement notre dépendance accrue aux matériaux et aux aléas de leur approvisionnement. Car tous nos objets technologiques sont concernés, pas seulement ceux de haute technicité. Des tensions existent également sur les commodités comme le béton, l'acier, et même le bois. ●

LEXIQUE

Matériau critique

Matériau indispensable à l'industrie et dont l'approvisionnement, soumis à divers aléas géopolitiques et économiques, comporte des risques.

Terres rares

En chimie, groupe constitué d'éléments métalliques aux propriétés voisines. Il en existe une quinzaine. On en trouve dans de nombreux objets de notre vie courante : aimants, radiographies médicales, éclairages fluorescents, téléphones, télévisions, etc. (voir p. 29)

FOCUS

Programmer les besoins en ressources minérales de la transition énergétique

Dans le cadre de la loi sur la Transition énergétique pour une croissance verte de 2015, le ministère de la Transition écologique et solidaire a lancé en 2019 une convention. Sa mission : établir un plan de programmation des ressources minérales de la transition énergétique. Du fait de son activité de recherche en la matière et de sa compréhension de l'ensemble de la chaîne de valeur (voir les analyses du cycle de vie p. 24), le CEA est naturellement impliqué dans trois des quatre groupes de travail de la convention : solaire photovoltaïque ; stockage stationnaire et réseaux ; mobilité électrique ; énergie éolienne. Avec le BRGM et l'IFPEN, il coconstruit des recommandations qui nourriront le rapport du ministère d'ici fin 2021.



Page 16

Minerais de nickel.



Ci-dessus à gauche

Moteur électrique à aimants permanents en alliage NdFeB (Néodyme, fer et bore) contenant moins de terres rares.



Ci-dessus à droite

Extraction liquide-liquide pour la séparation des métaux ou le recyclage des terres rares.

DÉCHETS ÉLECTRONIQUES

Le défi des recycleurs

Récupérer l'ensemble des matériaux des déchets électroniques, et pas seulement les plus faciles ou les plus précieux : tel est le défi lancé aux recycleurs. La réponse passe par une combinaison de technologies.

« Si techniquement on sait tout recycler, on ne sait pas le faire avec un modèle économique viable. »

Daniel Meyer, du CEA-Isec

« Sur un circuit imprimé, on trouve les deux tiers des éléments du tableau périodique de Mendeleïev. Or, on ne recycle que les plus faciles à récupérer ou ceux à haute valeur ajoutée. Jean-Christophe Gabriel s'en désolé : aujourd'hui, seuls 30 % de la masse d'un circuit imprimé sont recyclés, correspondant à 60 % de sa valeur ». Son équipe du CEA-Iramis s'est alliée en août 2018 avec l'université technologique de Nanyang à Singapour pour former un laboratoire commun, baptisé Scarce. Son objectif : augmenter la quantité d'éléments récupérés.

Quoi de commun entre une vieille télévision cathodique des années 1970 et un téléphone jeté au bout de deux ans ? Pas grand-chose, si on les regarde sous l'angle du recyclage. *« C'est un gros problème pour les recycleurs, souligne Jean-Christophe Gabriel. Un procédé fonctionne pour un type d'objet mais pas pour tous ».* C'est pour cette raison qu'aujourd'hui le recyclage est un peu « brutal » : on brûle le circuit imprimé, on récupère et on sépare les métaux précieux fondus (or, platine, cuivre). Mais en oubliant quantité de matériaux intéressants : terres rares, tantale, tungstène, silicium...

Travailler autrement

Il faut donc travailler autrement. D'abord, démanteler les circuits électroniques avec toutes les méthodes possibles : chimiques, mécaniques, thermiques. Puis trier finement. *« Nous avons mis en place un outil séparant les composants par taille et par nature, indique le chercheur. Il combine pour cela de multiples technologies, notamment l'imagerie optique et de rayons X. On obtient ainsi des "boîtes de tri" contenant des fragments plus riches que la moyenne en certains*

composants, comme le tantale ou les terres rares. Comme ces "boîtes" sont enrichies, cela vaut la peine d'en extraire ces éléments ». Pour l'heure, les chercheurs du CEA travaillent à mettre en place un démonstrateur pour valider la faisabilité économique de la méthode. *« Si les industriels sont intéressés, la montée en échelle peut être très rapide avec mise sur le marché de ces technologies en trois à cinq ans »,* précise Jean-Christophe Gabriel. L'intérêt principal de ce projet est de prendre en compte tous les déchets. Car *« on ne construira pas une usine de recyclage par déchet »,* prévient Daniel Meyer, du CEA-Isec.

À quel prix ?

Qu'en est-il de l'aspect économique ? *« Si techniquement on sait tout recycler, on ne sait pas le faire avec un modèle économique viable »,* constate Daniel Meyer. Et un industriel ne lancera une usine de recyclage que s'il est certain de disposer de suffisamment de déchets pendant une dizaine d'années. Il a besoin pour cela d'une collecte réglementée. Certes, les déchets électroniques font l'objet d'une réglementation avec une obligation de recyclage de plus de 90 % du matériau. Mais, pour l'heure, la méthode et les procédés utilisés dégradent les propriétés des matériaux : *« lorsque la technologie consiste à tout broyer, cela ne permet pas de valoriser certains matériaux comme le verre, l'argent, le silicium »,* souligne Luc Aixala. Deux possibilités : imposer un recyclage plus important, ou compenser la différence de prix entre un matériau et le même matériau recyclé par une éco-participation. Le recyclage ne se développera pas sans un coup de pouce de la puissance publique. ●

CHIFFRE-CLÉ

30 %

de la masse d'un circuit imprimé seulement recyclés aujourd'hui.

Le savoir-faire du nucléaire à la rescousse

LEXIQUE

Amphiphile

Caractéristique d'une molécule d'être à la fois hydrophile et lipophile, c'est-à-dire de pouvoir absorber l'eau tout en évitant les contacts avec elle.

« Grâce à l'utilisation complémentaire d'ultrasons, nous sommes capables de dissoudre certains éléments de manière moins polluante. »

Stéphane Pellet-Rostaing,
directeur de l'ICSM

La mission historique de l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM) est de séparer les matériaux du cycle de l'énergie nucléaire. Au fil du temps, ses compétences se sont appliquées à tous les éléments chimiques.

Séparer les éléments pour les recycler, c'est la raison d'être de l'ICSM. Et ce, en partant de problématiques concrètes, au plus près des besoins des industriels. « Nous développons des procédés d'extraction liquide-liquide et solide-liquide, en couplant par exemple certains procédés connus, comme la filtration par membranes et l'extraction solide-liquide. Nous étudions également des méthodes moins connues », indique Stéphane Pellet-Rostaing, directeur de l'ICSM, qui cite la « flottation ionique ». Celle-ci consiste à entraîner des métaux dissous dans de la mousse puis à les récupérer sélectivement ; et cela, en incorporant dans la solution des molécules amphiphiles qui se fixent à des ions. Les scientifiques s'intéressent aussi à développer des formulations inédites pour extraire... sans extractants ! Cela, dans le but d'une hydrométallurgie raisonnée,

tant du point de vue de son impact environnemental que de sa durabilité économique.

Démanteler puis extraire

Mais avant l'extraction, il faut pouvoir démanteler les objets. L'ICSM a ainsi mis au point une méthode de prétraitement de cartes électroniques pour en extraire le tantale à l'aide de liquides ioniques (des sels qui fondent à basse température, en dessous de 100 °C). Cette solution est à l'origine de la création d'une start-up, baptisée Sanou Koura (« or nouveau » dans un dialecte malien).

Pour être efficace, il faut souvent associer plusieurs technologies. Ainsi, l'extraction par liquide ionique suivie d'une électrodéposition (réaction chimique sous courant électrique) permet de récupérer le palladium et l'or sous forme métallique pure.

Progresser en recyclage, c'est aussi utiliser des technologies moins polluantes. Les métaux sont en effet souvent dissous à l'aide d'acides très corrosifs et dangereux, comme l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique. « Grâce à l'utilisation complémentaire d'ultrasons, nous sommes capables de dissoudre sélectivement certains éléments, notamment les terres rares, avec des acides beaucoup moins nocifs comme l'acide acétique (du vinaigre) ou citrique (présent dans le citron) », indique Stéphane Pellet-Rostaing. Recycler, oui, mais pas à n'importe quel prix environnemental. ●



Ci-contre

Étude à l'ICSM des mécanismes fondamentaux d'extraction liquide-liquide pour la séparation des métaux ou le recyclage des terres rares des déchets électroniques.

Risques sur les batteries

Pas de transition énergétique sans batterie. Indispensable pour passer des combustibles fossiles aux énergies intermittentes, la batterie permet de stocker l'électricité. L'essor prévu des véhicules électriques tire très fortement le marché des batteries au lithium, avec des conséquences notables sur leurs matériaux constitutifs. Les chercheurs regardent plusieurs solutions...

« Une batterie actuelle lithium-NMC (nickel-manganèse-cobalt) contient environ 50 kg de matériaux critiques : nickel, cobalt, lithium, observe Fabien Perdu, ingénieur au CEA-Liten. Il faut compter environ 1 kg de métaux critiques par kilowattheure de batterie ». Elle contient également du graphite naturel, critique mais substituable par du graphite synthétique, et du cuivre qui ne tardera pas à rejoindre la fameuse liste des 45 matériaux critiques tant il irrigue toute la transition énergétique et numérique. Le manganèse ou l'aluminium, non critiques, connaissent toutefois quelques tensions régulières. Au final, seul le fer est abondant. Risque-t-on vraiment une pénurie ? « Il faut distinguer les réserves des ressources, avertit Fabien Perdu. Les réserves, ce sont les gisements connus et exploitables avec les technologies actuelles, au coût du marché. Les ressources sont ce que l'on pense exploiter plus tard ». Avec les réserves identifiées aujourd'hui, on peut fabriquer environ 1 milliard de batteries de 50 kWh, ce qui est l'énergie standard d'un modèle de voiture comme la Zoé de Renault. Or, selon les projections actuelles, on atteindrait le milliard de véhicules électriques en 2040 ou 2050. « À court terme, on ne manque pas de stock, analyse Fabien Perdu. En revanche, il peut exister des manques de flux : la capacité de production des mines est limitée et on observera peut-être un goulot d'étranglement sur le nickel vers 2027. Or, il faut une dizaine d'années pour ouvrir une mine ! »

Rapatrifier la production

Les deux métaux les plus en tension pour les batteries sont le cobalt et le nickel. Le premier est peu abondant et concentré en République démocratique du Congo qui le produit à bas coût en recourant au travail des enfants. De plus, il n'est pas extrait pour lui-même : c'est un coproduit de l'extrac-





© D.Guillaudin/CEA

tion de minerais comme le cuivre ou le nickel. Les quantités extraites dépendent ainsi bien plus du marché de ces autres métaux, ce qui engendre beaucoup de fluctuations dans les prix du cobalt.

Le minéral de nickel est mieux réparti. Cependant, la majorité de son raffinage est effectué en Chine. « *La production des matériaux critiques est surtout concentrée en Chine, observe Fabien Perdu. Il est important de la rapatrier pour des raisons stratégiques et environnementales. En effet, l'électricité consommée pour la fabrication d'une batterie peut être une contribution importante aux émissions de CO₂, et le kilowattheure français émet dix fois moins de CO₂ que le kilowattheure chinois. Rapatrier la chaîne de production permettrait de diviser presque par deux les émissions de CO₂ de la fabrication des batteries* ». En réalité, c'est l'ensemble des étapes qu'il faudrait relocaliser : la synthèse de matériaux actifs à partir de minerais, la fabrication des cellules, celle de l'aluminium, jusqu'au recyclage de ces métaux. « *Pour aider ce rapatriement, le CEA travaille sur les procédés d'extraction plus propres* », indique Luc Aixala, chef de programme à la Direction des énergies du CEA. Tout comme, avec les partenaires industriels, il se penche sur d'autres types de batteries. Par exemple, les batteries LFP (lithium-phosphate de fer) contiennent certes autant de lithium, mais les métaux critiques sont remplacés par du fer. Elles s'avèrent aussi moins coûteuses.

Cependant, leur plus faible densité d'énergie constitue un handicap pour les applications en mobilité.

Recyclage... et tempérance

Quant au recyclage, les équipes du CEA travaillent à développer des procédés à moindre impact environnemental et préservant au maximum le taux de pureté des matériaux. Initialement peu utile car le nombre de batteries en fin de vie sera faible par rapport aux besoins, le recyclage fournira vers 2040 une part non négligeable des matériaux, à condition que soit mise en place une filière efficace d'ici là. En effet, les verrous au recyclage ne sont pas tant techniques qu'économiques : les recycleurs ont besoin de volumes assurés. Or, la tentation sera grande d'envoyer ces déchets en Chine qui investit dans des usines dix fois plus grosses que celles dont pourrait se doter l'Europe. Par ailleurs, la bonne organisation de la collecte et du recyclage a besoin de politiques publiques qui puissent en assurer la compétitivité : aujourd'hui, le cobalt recyclé reste plus cher que le cobalt du Congo.

La seconde vie des batteries est une option intéressante. En effet, le pack d'un véhicule électrique qui n'offrirait plus assez d'autonomie peut être parfaitement affecté au stockage stationnaire d'énergies renouvelables, lequel nécessite moins de puissance. « *Nous travaillons à qualifier ces batteries : enlever les éléments défaillants, réorganiser*

le système afin de répondre aux nouveaux besoins », explique Étienne Bouyer.

Mieux calibrer les performances aux usages

Être « raisonnable » sur la taille des batteries est ainsi une autre solution. « *Il existe actuellement une course aux grosses batteries car on veut que le véhicule électrique ait la même autonomie que le véhicule thermique, observe Fabien Perdu. C'est une ineptie ! Il faut des solutions différentes pour les trajets courts (moins de 50 km) et pour les trajets longs : hybride rechargeable, remorque avec batterie ou pile à combustible à louer* ». On peut aussi envisager la route électrique sur laquelle se rechargerait le véhicule en roulant, soit par caténaires (pour les camions uniquement), soit des rails au sol, soit par induction. Mais ces solutions, même rentables à terme, impliquent de gros investissements en infrastructures, et l'induction consomme beaucoup de cuivre... Ou quand la problématique des matériaux critiques apparaît dans toute sa complexité. ●

←
À gauche

Sous-produits du recyclage d'une batterie lithium-ion.

↑
Ci-dessus

Éclaté d'un pack batteries lithium-ion développé au CEA-Liten.

ENTRETIEN

Trouver la meilleure option avec l'ACV



«L'ACV est une méthode normalisée pour quantifier les impacts environnementaux d'un système, qu'il s'agisse d'un produit, d'une technologie, d'un scénario économique...»

Élise Monnier,
ingénieure au CEA-Liten



Page de droite

Aimant permanent en alliage NdFeB (Néodyme, fer et bore) contenant moins de terres rares lourdes (dysprosium ou terbium) que les aimants produits il y a 20 ans.

Depuis quand le CEA se consacre-t-il à l'analyse du cycle de vie et en quoi cela consiste-il ?

Le CEA-Liten s'est spécialisé à l'analyse du cycle de vie (ACV) depuis 2009. Nous le faisons à la demande des industriels dans le cadre de nos collaborations ou pour accompagner nos propres développements technologiques. L'ACV est une méthode normalisée pour quantifier les impacts environnementaux d'un système, qu'il s'agisse d'un produit, d'une technologie, d'un scénario économique... L'ACV doit prendre en compte plusieurs critères. En cela, elle se distingue par exemple d'un bilan carbone qui ne considère que les gaz à effet de serre. Elle consiste à couvrir idéalement l'ensemble d'une chaîne de valeur : acquisition des matières, fabrication, usage et recyclage. Elle peut considérer jusqu'à 16 indicateurs d'impact recommandés par l'Europe : biodiversité, acidification des eaux, changement climatique, utilisation des ressources, etc. Certaines ACV sont simples, celle d'un stylo nécessitera seulement une journée. D'autres se révèlent plus complexes, comme celle d'une technologie en développement, et pourront prendre six mois.

Quelle est son utilité ?

Un des buts est d'éviter les transferts d'impact : sans cette analyse globale, on peut améliorer une étape en dégradant une autre, ou faire progresser un critère au détriment d'un autre. On le voit si l'on compare le véhicule thermique et le véhicule électrique. Le premier émet plus de CO₂ à l'usage, mais le second consomme davantage de ressources minérales, notamment des matériaux critiques. L'ACV permet

de quantifier cela. Elle peut être réalisée avant le développement d'un procédé ou d'un produit, ou bien après. On réalise aussi des ACV au fur et à mesure qu'une technologie se développe, en soutien de décisions et de stratégies énergétiques.

Que disent les ACV sur l'économie circulaire ?

L'ACV a son intérêt sur les questions de recyclage : est-il plus vertueux de recycler un produit ou d'en produire un nouveau plus efficace ? Souvent, les choix pour la fin de vie d'un produit font varier de 10 % à 30 %, en positif ou négatif, les impacts environnementaux. L'ACV renseigne aussi sur la meilleure manière d'utiliser les produits. Par exemple, lorsqu'un produit est très polluant, il vaut mieux en acheter un neuf plus efficace que de prolonger sa durée de vie. Les ACV montrent aussi que la mutualisation des usages entraîne systématiquement de forts gains environnementaux : mieux vaut utiliser des voitures partagées ou en louer que de posséder sa propre voiture.

Et sur la récupération des matériaux critiques ?

Considérons le cas des aimants d'éoliennes. L'ACV peut aider à choisir entre plusieurs options : la réutilisation, le *remanufacturing*, ou le recyclage. Dans le premier cas, on réutilise l'objet presque tel quel, mais les performances ne sont pas toujours optimales. Le *remanufacturing* implique de démanteler, séparer, remettre à neuf. Enfin, le recyclage en boucle fermée nécessite de réintroduire les matériaux dans le processus de fabrication, pour couler de nouveaux aimants. Pour ces aimants, à l'échelle industrielle, le *remanufacturing* est la meilleure stratégie. ●



Aimants cherchent terres rares

La fabrication d'aimants permanents dépend de la Chine, en situation de quasi-monopole sur leurs composants. Leur substitution est difficile.

Les aimants permanents sont indispensables à la transition énergétique : on les trouve dans les voitures électriques, les génératrices d'éoliennes, et certains moteurs industriels. Or, les plus performants contiennent des terres rares produites à plus de 80 % en Chine. « *Le marché européen du véhicule électrique va nécessiter 2 000 à 4 000 tonnes d'aimants permanents par an au cours de la décennie, et 30 % de leur masse est constituée de terres rares*, indique Gérard Delette du CEA-Liten. *Entre 2020 et 2030, la quantité de terres rares utilisées dans ce secteur devrait être multipliée par 5* ».

Les solutions ressemblent à celles évoquées pour les autres matériaux critiques : diversifier les approvisionnements, substituer et recycler. Or, la diversification apparaît difficile tant la Chine a la main mise sur ce marché et sur les prix. Des projets de mines sont certes annoncés en Australie, aux États-Unis, au Canada, et même à l'étude en Europe (Groenland et Suède), mais il faut entre 5 et 10 ans avant la production en masse pour que cela devienne une nouvelle filière.

Terres pas si rares

Toutes les terres rares ne se valent pas. Certaines sont encore moins abondantes que d'autres, et leur production est encore plus localisée. C'est le cas des terres rares « lourdes », le dysprosium et le terbium, qui servent notamment à stabiliser les aimants en température. Sans ces éléments, leur température limite de fonctionnement serait de 100 °C contre 180 °C. On sait aujourd'hui en utiliser moins, en les mettant juste aux bons endroits : 0,5 à 1 % suffisent contre 5 à 10 % auparavant. Le risque se reporte alors sur des terres rares plus

abondantes mais désormais plus utilisées, comme le néodyme. « *L'accroissement de la demande mondiale en néodyme pourrait, dans les prochaines années, dépasser les perspectives de croissance de la production chinoise* », souligne Gérard Delette.

La tendance est donc à la substitution, au moins partielle, par des terres rares encore plus abondantes et aujourd'hui délaissées. En travaillant sur la microstructure des aimants, le cérium et le lanthane seraient de bons candidats. Mais ils n'ont pas les mêmes propriétés magnétiques, c'est pourquoi on ne peut remplacer qu'un tiers du néodyme par du cérium, par exemple. L'avantage reste toutefois important : « *les proportions utilisées correspondent aussi aux concentrations naturelles dans le minerai, on pourrait donc éviter de les séparer, ce qui limiterait les impacts sur l'environnement* », explique Gérard Delette.

Besoins difficiles à combler

Les recherches se poursuivent pour remplacer les aimants à base de terres rares par d'autres matériaux qui en contiennent moins. Toutefois, les performances de ces matériaux restent moindres et leur coût de production demeure élevé si bien qu'ils ne peuvent pas contribuer à une alternative aux aimants de terres rares à court terme. Reste le recyclage. Les aimants sont très peu dégradés en fin de vie. « *On peut souvent les réutiliser tels quels*, indique Gérard Delette. *Mais au vu des progrès réalisés ces dernières années, il peut être plus utile de les refondre ou de les réduire en poudre pour ajuster leur composition ou ajouter des éléments...* » Cependant, peu d'aimants en fin de vie seront disponibles pour faire face aux besoins des cinq prochaines années. Et la filière de recyclage reste à construire. ●

« Entre 2020 et 2030, la quantité de terres rares utilisées dans le secteur du véhicule électrique devrait être multipliée par 5. »

Gérard Delette,
chercheur au CEA-Liten



CEA-Liten

Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).

CEA-Iramis

Institut rayonnement matière de Saclay.

CEA-Isec

Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (Marcoule).

TOUT S'EXPLIQUE

Smartphone, une mine urbaine

Toujours plus de performances et de fonctionnalités ? Les métaux sont au cœur des dispositifs numériques, à commencer par les incontournables smartphones.

L'évolution de l'électronique obéit à deux tendances : toujours plus petit et toujours plus diversifié ! Or, l'ajout de nouvelles fonctionnalités multiplie le nombre de composants et de métaux requis.

Souveraineté minérale

« La pénurie actuelle de semi-conducteurs illustre la dépendance de l'Europe à des fournisseurs étrangers. Aujourd'hui, c'est en Asie que sont conçus et fabriqués les processeurs, composants maîtres. Certes, l'Europe et la France disposent encore de compétences, par exemple sur les caméras (STMicroelectronics) ou les substrats des parties radiofréquence (Soitec). Il y a un fort enjeu de souveraineté technologique et industrielle », indique Thomas Ernst, directeur scientifique du CEA-Leti, institut à l'origine des premiers accéléromètres, micro-capteurs permettant à l'affichage de l'écran de s'adapter à sa position horizontale ou verticale.

Se pose dès lors la question de la souveraineté minérale, tant les désormais très nombreux métaux utilisés sont produits hors d'Europe. Une situation de « criticité » que les scientifiques du Leti cherchent à pallier en substituant certains métaux par d'autres, ou en récupérant le maximum d'entre eux lors des différents procédés de micro-électronique. Quant au recyclage, ils y travaillent. Mais, de l'avis de la directrice de recherche Léa di Cioccio : « ces métaux sont extraits des composants sous une forme oxydée qui complique leur réutilisation pour la microélectronique. Par ailleurs, les composants sont tellement miniaturisés, intégrés, et les métaux mélangés que leur récupération reste marginale. »

Des marges de manœuvre existent, avec des actions prolongeant la durée de vie des dispositifs en évitant par exemple que les nouveaux logiciels soient incompatibles avec les versions antérieures. Autres alternatives : la réparabilité des smartphones ou la deuxième vie des composants pour d'autres applications. Mais ces derniers doivent pouvoir être facilement extraits, ce qui suppose une connectique plus grosse se répercutant sur la taille du smartphone. Des entreprises européennes comme FairPhone ou Puzzle Phone se sont lancées dans cette aventure, sans grand succès commercial. Avant que cela ne devienne bientôt la nouvelle tendance !

PAR AUDE GANIER,
EN COLLABORATION AVEC
LEA DI CIOCCIO ET THOMAS ERNST
DU CEA-LETI

FOCUS

Le saviez-vous ?

70 kg

de matières premières sont nécessaires pour produire, utiliser et éliminer un seul smartphone (soit environ 500 fois son poids).

1,55 milliard

de smartphones ont été vendus en 2018 dans le monde (122 millions en 2007).

100 millions

de téléphones dormiraient dans les tiroirs des Français.

15 %

des smartphones mis sur le marché sont recyclés.

Une vingtaine

de leurs métaux seulement sont actuellement recyclables.

Nombre de matériaux dans les téléphones

± 12

dans un téléphone fixe en 1950

± 30

dans un gros téléphone portable en 1990

± 60

dans un smartphone en 2010

source → www.reporterre.net

Voir aussi l'interview de Guillaume Pitron et de Lux Aixala, *Les défis du CEA* n° 243, p. 30-31.

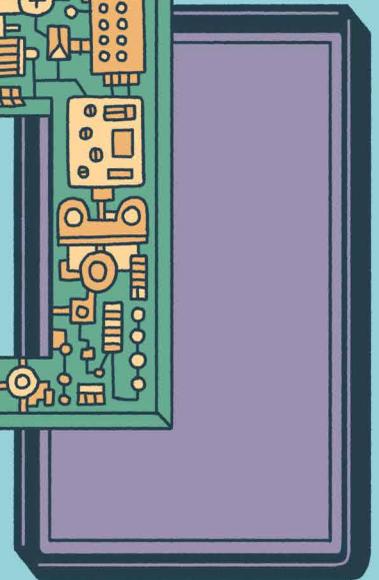
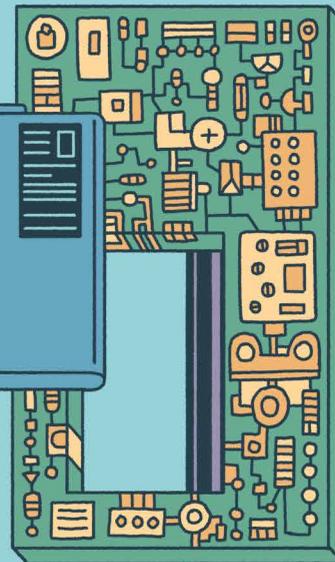
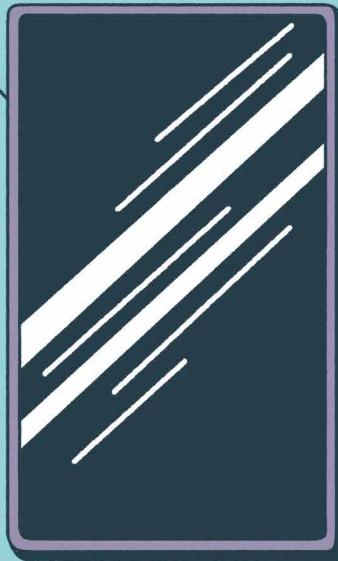
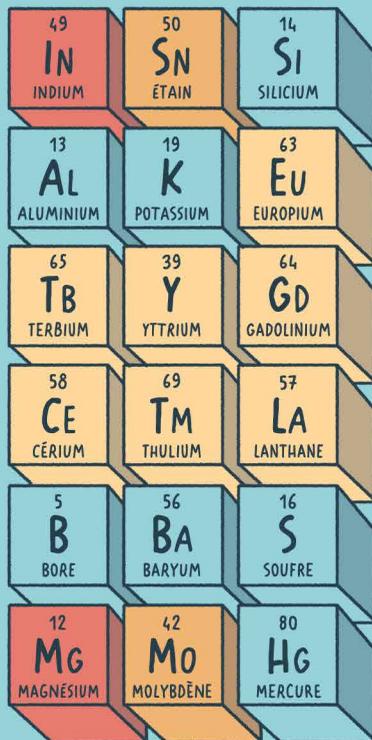


Les matières premières d'un smartphone

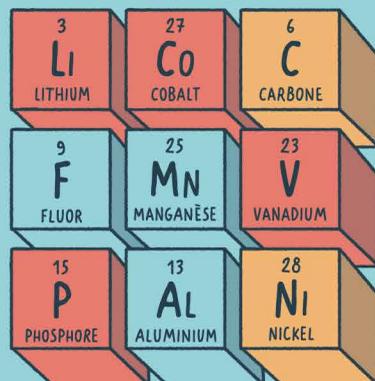
Plus de 60 matériaux, sur les 103 éléments du tableau périodique de Mendeleïev, entrent dans la composition d'un smartphone. Parmi eux, une grande majorité sont identifiés comme « critiques » par l'Union européenne et comme « stratégiques » par la France qui n'en maîtrise pas la production.

ÉCRAN

DALLE TACTILE, VITRE, AFFICHAGE



BATTERIE



BOÎTIER





TRAJECTOIRE

Plusieurs tours du monde pour fabriquer un smartphone

1

Conception

Le plus souvent aux États-Unis.

2

Extraction et conditionnement des matériaux

Par exemple, en part de la production mondiale : Chine (86% des terres rares lourdes et légères, 89% du magnésium, 80% du bismuth, gallium et germanium), Afrique du Sud (93% du ruthénium, 80% du rhodium, 71% du platine), Congo (59% du tantale et 64% du cobalt), États-Unis (88% du béryllium), Brésil (92% du niobium), Chili (44% du lithium), France (49% du hafnium).

3

Fabrication des composants

En Asie, États-Unis et Europe.

4

Assemblage

En Asie.

5

Distribution

Dans le monde entier.

ÉLECTRONIQUE CARTE ET COMPOSANTS (PROCESSEURS, CAPTEURS, CONDENSATEURS, RADIOFRÉQUENCE, VIBREUR, CAMÉRA, MICROPHONE, HAUT-PARLEUR...)

28 Ni NICKEL	82 Pb PLOMB	50 Sn ÉTAIN	83 Bi BISMUTH	79 Au OR	47 Ag ARGENT	74 W TUNGSTÈNE	78 Pt PLATINE
45 Rh RHODIUM	4 Be BÉRYLLIUM	29 Cu CUIVRE	15 P PHOSPHORE	33 As ARSENIC	31 Ga GALLIUM	32 Ge GERMANIUM	14 Si SILICIUM
40 Zr ZIRCONIUM	44 Ru RUTHÉNIUM	60 Nd NÉODYME	26 F FER	5 B BORE	62 Sm SAMARIUM	27 Co COBALT	59 Pr PRASÉODYME
17 Cl CHLORE	66 Dy DYSPROSIUM	73 Ta TANTALE	41 Nb NIOBIUM	46 Pd PALLADIUM			

MATIÈRES PREMIÈRES

Critiques

Un matériau est dit « critique » quand la difficulté de son approvisionnement, sujet à des aléas, peut entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs importants. La Commission européenne en dresse tous les trois ans depuis 2011 une liste qui en compte aujourd'hui 45 :

Antimoine / Baryte / Bauxite / Béryllium / Bismuth / Borate / Caoutchouc naturel / Charbon à coke / Cobalt / Gallium / Germanium / Graphite naturel / Hafnium / Indium / Lithium / Magnésium / Niobium / Platinoïdes / Phosphate naturel / Phosphore / Scandium / Silicium métal / Spath Fluor / Strontium / Tantale / Titane / Tungstène / Vanadium.

+ Terres rares légères : Cérium / Lanthane / Néodyme / Praséodyme / Prométhium / Samarium / Scandium.

+ Terres rares lourdes : Dysprosium / Erbium / Europium / Gadolinium / Holmium / Lutécium / Terbiem / Thulium / Ytterbium / Yttrium.

Stratégiques

Un matériau est dit stratégique lorsqu'il est indispensable à la politique économique, énergétique et à la défense d'un pays. Le Comité pour les matériaux stratégiques (Comes) de la France en ajoute 13 à la liste européenne : Argent / Carbone / Chrome / Cuivre / Étain / Molybdène / Nickel / Palladium / Rhénium / Rhodium / Sélénium / Tellure / Zirconium.

LÉGENDE

- Matériaux critiques pour l'Union européenne.
- Matériaux stratégiques, en plus des matériaux critiques, pour la France.
- Terres rares, toutes critiques.

REGARDS CROISÉS

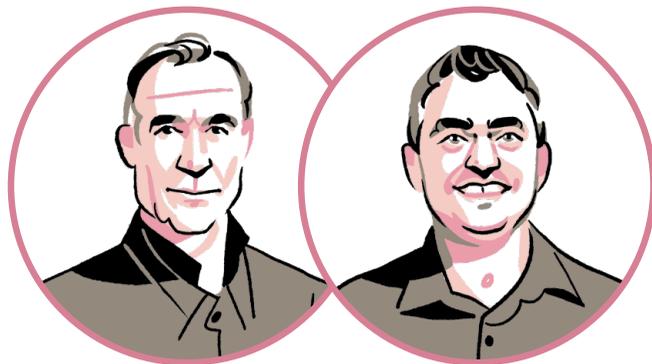
Rallye Dakar Cap vers l'hydrogène

Mike Horn

aventurier-explorateur,
initiateur du projet Gen Z.

Johann Lejosne

ingénieur responsable
du partenariat Gen Z
au CEA-Liten.



Mike Horn, aventurier de l'extrême, et Cyril Despres, quintuple vainqueur du Dakar à moto, se sont fixés un nouveau défi à leur mesure : révolutionner le sport automobile et, au-delà, la mobilité. En 2023, ils participeront à la course des voitures à bord d'un véhicule électrique hydrogène. Objectif : gagner le rallye raid afin de promouvoir cette technologie. L'ambitieux projet, Gen Z, est confié à Vaison Sport et au CEA.

Mike Horn Décembre 2019, je me trouve au beau milieu du pôle Nord. Sur mon téléphone satellitaire, je reçois l'appel de Cyril Despres. Il sera présent à l'édition de janvier 2020 du Dakar et il me veut à ses côtés. Dès la fin de mon expédition, je me rends en Arabie saoudite.

J'ai été alors beaucoup critiqué pour ma participation à ce rallye raid, qui est en effet très polluant.

En trente ans seulement, au fur et à mesure de mes expéditions, j'ai vu la Terre changer. J'ai deux filles, et je veux leur laisser la planète dans un meilleur état que celui dans lequel je l'ai reçue. Je suis allé au Dakar 2020 avec cette conscience et détermination, pour voir comment changer les choses. Et avec Cyril, nous avons eu la même idée : revenir avec un véhicule propre et gagner

pour montrer que l'on peut se passer des énergies fossiles. Nous en avons parlé à notre partenaire Vaison Sport. Ainsi a commencé l'aventure Gen Z.

La rencontre

Johann Lejosne Septembre 2020, je reçois un appel de Cyril Despres. Il cherche un partenaire pour développer la chaîne énergétique d'un véhicule bas carbone pouvant concourir au Dakar. Lui, Mike Horn et Matthieu Parent de Vaison Sport savent précisément ce qu'ils veulent. Ils ont déjà vu différents industriels et souhaitent rencontrer le CEA... dès la semaine suivante ! Dès que Mike Horn arrive, je comprends l'enjeu. Sa poignée de main est très persuasive, tant ce projet est important pour

« En trente ans seulement, au fur et à mesure de mes expéditions, j'ai vu la Terre changer. J'ai deux filles, et je veux leur laisser la planète dans un meilleur état que celui dans lequel je l'ai reçue. »

Mike Horn

lui. Nous visitons les installations et rencontrons les équipes. Avant même de commencer notre réunion, il annonce que le véhicule doit être prêt pour janvier 2022 ! Or, malgré toute la bonne volonté du monde et son énergie, il est inconcevable de réaliser un tel véhicule en un an et demi.

Prise de risque

M.H. Je savais bien que l'échéance 2022 était irréaliste. Je l'ai donnée pour qu'on comprenne bien l'urgence ! Avec Cyril, nous voulons être les premiers à gagner le Dakar avec un véhicule bas carbone.

J.L. Je confirme que, dès la première rencontre, Mike nous a vraiment mis la pression ! Pour ce type de projet, en temps normal, il faut compter trois à quatre ans.

M.H. Justement, si on raisonne en « normal », le produit ne sera que « normal ». Il faut donner un peu plus que les autres, repousser ses limites. Quand tu pars pour traverser le pôle Nord, ce qui n'a jamais été fait, tout le monde te dit que c'est risqué. Or, c'est risqué de ne pas y aller alors que tu sais que tu peux le faire. C'est avec cette attitude que j'ai appréhendé toutes mes expéditions.

Au CEA, j'ai trouvé les meilleurs ingénieurs. L'organisme est structuré, organisé et sécurisé. Mais je suis là pour dire qu'il faut prendre des risques pour développer un produit qui ait une longueur d'avance.

PROPOS RECUEILLIS
PAR AUDE GANIER

Vu les délais, le CEA voyait cela comme un risque d'engagement. Non : c'est si tu ne t'engages pas que tu prends un risque, y compris pour la planète.

J.L. Alors, nous nous sommes engagés pour que le véhicule soit prêt en 2023 ! Techniquement, c'est faisable, mais nous n'avons aucune marge de manœuvre sur le planning.

Des contraintes extrêmes

M.H. Le projet est très ambitieux. Le Dakar se court en douze étapes de 700 km environ chacune, il n'y a pas une course au monde qui soit plus exigeante : vous roulez à fond sur des dunes, aucune piste, sans informations car il n'y a pas de GPS ; vous découvrez au fur et à mesure où vous avancez, c'est pour cela qu'il y a des accidents graves chaque année, parfois mortels. C'est vraiment une aventure extrême.

Avant de rencontrer le CEA, nous avions déjà exclu l'option d'un véhicule 100 % batteries. Comment imaginer un Dakar où l'on s'arrête tous les 80 km pour recharger ? Il ne s'agit pas de dénaturer l'esprit de la course.

J.L. Nous proposons ainsi une chaîne énergétique hybride hydrogène/batteries. La pile à combustible de type PEMFC¹ assure l'autonomie du véhicule que nous poussons à 250 km, car les organisateurs du Dakar autorisent depuis quelques années des ravitaillements tous les 250 km. Quant à la batterie, elle vient apporter un complément de puissance quand cela est nécessaire.

Si cela paraît simple en laboratoire, cette chaîne énergétique PEMFC-batteries-moteur-interface-réservoir doit assurer des pics de vitesse de 180 km/h tout en supportant les conditions extrêmes du Dakar : températures dépassant les 45 °C ; poussières de sable qui bouchent les filtres à air de la PEMFC ; chocs et vibrations contraignant fortement l'ensemble du système.

Les performances et la fiabilité doivent être à la hauteur du challenge sportif. En

« Les meilleurs experts du CEA ont été recrutés. Nous sommes une vingtaine avec des responsabilités sur différents lots : véhicule, PEMFC, hybridation, qualité, sécurité, achats, etc. Il a fallu également convaincre en interne car, si le contrat n'a été officiellement signé qu'en juin 2021, nous n'avions d'autre choix que de démarrer le projet dès la première rencontre ! »

Johann Lejosne

revanche, nous ne faisons aucun compromis avec la sécurité de l'équipage.

Une aventure humaine

J.L. Pour cela, nous avons monté une équipe de choc. Les meilleurs experts du CEA ont été recrutés, même si engagés dans d'autres projets. Nous sommes une vingtaine avec des responsabilités sur différents lots : véhicule, PEMFC, hybridation, qualité, sécurité, achats, etc. Il a fallu également convaincre en interne car, si le contrat n'a été officiellement signé qu'en juin 2021, nous n'avions d'autre choix que de démarrer le projet dès la première rencontre ! L'équipe est soudée et très mobilisée pour défier sur le terrain les développements. Comme dit Mike, les choses faciles ne sont pas intéressantes à faire !

M.H. Il s'agit avant tout d'une aventure humaine. C'est important que tous ceux qui sont impliqués dans le projet puissent le partager ensemble et avec les autres. Je

filme tout depuis le début, les échecs et les réussites, les sentiments de l'équipe. Quand on part dans une direction, il faut le montrer. La communication est très importante, alors je réaliserai un documentaire de cette aventure. Il est important que le CEA puisse partager ses connaissances et son savoir-faire technologique et aussi que l'on montre ce qu'il se passe à bord de la voiture. On a tous besoin les uns des autres.

Feuille de route

J.L. Dès septembre 2020, nous avons développé un système de monitoring, pour acquérir un maximum d'informations de terrain, que Mike et Cyril ont embarqué sur leur véhicule lors du Dakar 2021. Nous avons ensuite analysé ces données pour déterminer les profils type du véhicule en roulage.

M.H. Et nous sommes même arrivés dans les dix premiers avec ce laboratoire roulant !

J.L. Ensuite, nous travaillons sur chaque lot (le stack PEM, le stockage de l'hydrogène, l'architecture hybride, le choix des moteurs, etc.) tandis que Vaison Sport avance sur le véhicule. L'objectif est d'avoir un prototype d'ici l'été 2022 et de le faire rouler pendant deux mois sur les pistes de Vaison Sport. Puis, on réalisera le second prototype, et les deux véhicules partiront au Dakar 2023 !

M.H. Et nous gagnerons, même si nous arrivons dans les dix premiers. L'enjeu est de montrer que l'hydrogène est tout aussi performant que le thermique. D'ailleurs, les organisateurs du rallye sont conscients que s'ils n'opèrent pas ce changement, leur course disparaîtra. Mais le Dakar n'est qu'un premier pas, car c'est de toute la mobilité dont il s'agit. Nous voulons que les énergies fossiles n'aient plus de sens. Nous pourrions alors transmettre aux jeunes générations une planète où il y a de l'espoir et de nouveaux challenges ! ●

1. Pile à combustible à membrane d'échange de protons.

AGORA L'ACTU DU CEA

INNOVATION

3 concours, 6 lauréats CEA

i-Lab, i-Nov et i-PhD sont trois concours nationaux du ministère de la Recherche. Organisés en partenariat avec Bpifrance, ils visent à encourager l'esprit d'entreprendre dans la deeptech. Six start-up et projets issus du CEA figurent parmi les lauréats de l'édition 2021.

Prix i-Lab

Il valorise les résultats de la recherche publique à travers la création d'entreprises de technologies innovantes.

AgiLite

Instrumentation Lidar (technologie CEA-Leti)
AgiLite apporte une solution en rupture de capteur Lidar (système optique à base de laser pour la détection en 3D). Alliant miniaturisation, robustesse et haute performance, elle est pertinente pour la mobilité automatisée et autonome (aide à la conduite automobile, robotique industrielle et logistique, etc.).

AIHerd

Une solution pour les élevages industriels (technologie CEA-List)
Grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle et *via* des caméras installées dans les étables, la solution proposée par AIHerd permet un suivi en temps réel de l'état de santé des bovins (détection des anomalies de comportement).

Alkalee

Une plateforme pour l'électronique des véhicules (technologie CEA-List)
Alkalee propose aux constructeurs automobiles une plateforme logicielle leur permettant de compiler en un même endroit les multiples applications installées dans un véhicule.

Cette solution, d'une grande souplesse, facilite l'ajout de nouvelles fonctionnalités.

Direct Analysis

Des tests de détection pour la sécurité alimentaire (technologie CEA-Leti)
Direct Analysis propose une puce microfluidique d'extraction d'ADN pour les industriels de l'agroalimentaire. Rapide et sensible, elle permet de détecter la présence de micro-organismes pathogènes dans les produits ou au sein des unités de fabrication-transformation.

HUXI Biosciences

Un traitement pour l'hypertension artérielle pulmonaire (collaboration CEA-Joliot)
HUXI Biosciences propose un candidat médicament de rupture pour le traitement de l'hypertension artérielle pulmonaire. La start-up devrait être créée d'ici la fin de l'année 2021.

Prix i-PhD

Il récompense les jeunes chercheurs souhaitant créer ou cocréer une start-up deeptech en lien avec un laboratoire public de recherche.

ITIE

Visualisation de mouvements très rapides
ITIE est un projet de start-up porté par Mathieu Darnajou, jeune chercheur du CEA. Il exploite la technologie de tomographie par impédance électrique dans une solution de visualisation de mouvements potentiellement très rapides (typiquement des flux de matières à l'intérieur de canalisations ou de réservoirs). De nombreux secteurs d'application sont envisagés : industrie pétrolière, agroalimentaire, santé, etc.



© CEA

RELANCE ÉCONOMIQUE Visite européenne au TGCC

Enjeu de souveraineté, l'ordinateur quantique est l'un des domaines de recherche soutenus financièrement par le plan France Relance. Le TGCC (Très grand centre de calcul du CEA situé à Bruyères-le-Châtel) héberge notamment un simulateur quantique développé par Atos ainsi qu'un démonstrateur quantique porté par la start-up Pasqal. Deux projets que Ursula von der Leyen, la présidente de la Commission européenne, a visités le 23 juin, aux côtés du ministre de l'Économie Bruno Le Maire et du secrétaire d'État chargé des Affaires européennes Clément Beaune. En déplacement officiel en France, la commissaire est venue annoncer l'approbation par l'Union européenne du « Plan national de relance et de résilience » (PNRR) et remettre les 39,4 milliards d'euros associés. Ce feu vert signifie que les critères édictés par l'Europe ont bien été respectés, à savoir : au minimum, 37% des dépenses affectées à la transition écologique et 20% à la transition numérique. Tous les investissements du PNRR sont issus du plan national France Relance. Doté d'un budget de 100 milliards d'euros et en cours de déploiement, il a été annoncé en septembre 2020 pour faire face à la crise économique historique provoquée par la pandémie de Covid-19. SR



Ci-dessus

De gauche à droite, Ursula von der Leyen, Bruno Le Maire et Jean-Philippe Verger (directeur du centre CEA DAM Île-de-France), lors de la visite au TGCC.

CONCOURS

Premier Hackadem Sup'

Un concours d'innovation en ligne, près de 400 étudiants en lice, cinq mois de réflexion... Retour sur le Hackadem Sup', challenge sur le démantèlement nucléaire, organisé par le CEA.

« Utilise les nouvelles technologies et imagine des solutions innovantes pour démanteler les installations nucléaires. » Tel était le défi proposé aux étudiants francophones en cycle supérieur, lors du Hackadem Sup' lancé en janvier 2021 par le CEA et l'INSTN (l'école de spécialisation des énergies bas carbone et des technologies de la santé). « C'est la première fois que nous sollicitons des élèves en études supérieures, commente Adeline Bertoncini, coordinatrice de l'événement. La forme – une compétition 100 % digitale – était aussi une première. Ce dispositif, contemporain et au

« La jeune génération a répondu présent pour exploiter tout le potentiel des nouvelles technologies dans le domaine complexe du démantèlement nucléaire. Nous avons vu de nombreux étudiants créatifs et prêts à s'investir dans ces sujets ! »

Adeline Bertoncini,
coordinatrice de l'événement

plus proche des usages, a permis de toucher des étudiants au niveau national ».

191 projets proposés

Plus de 390 étudiants répartis en équipes de 2 à 4 personnes, venant de 88 établissements, ont répondu à l'appel et proposé 191 projets dans l'un des trois thèmes imposés : comment utiliser de manière optimale les gigantesques quantités de données nécessaires au démantèlement ? Comment être plus performant dans ces opérations de grande complexité tout en garantissant une sécurité maximale pour les intervenants ? Quelles solutions permettraient d'intégrer davantage d'objectifs de développement durable ? Cinq équipes ont été retenues pour la finale du 28 mai et ont défendu leur projet lors d'un grand oral, devant un jury composé de professionnels du démantèlement et de l'innovation.

Mousse et micro-algues

C'est un trio de l'université de Nîmes, Dorian, Julie et Sarah, élèves du master Risques environnementaux et sûreté nucléaire, qui a remporté le concours avec un bioprocédé combinant deux technologies : les micro-algues *Coccomyxa* et une mousse de décontamination développée par le CEA. « Découverte en 2013, *Coccomyxa* pousse en milieu extrême, très radioactif et pauvre en nutriments, et est capable de métaboliser la plupart des ions. Son association avec une mousse de décontamination permettrait de récupérer les contaminants, qui pourraient ensuite être concentrés lors d'une ultime étape de filtration », a expliqué Sarah. Pour le CEA et l'INSTN, ce premier événement d'*open innovation* digital est un succès. Comme le souligne Adeline Bertoncini, « la jeune génération a répondu présent pour exploiter tout le potentiel des nouvelles technologies dans le domaine complexe du démantèlement nucléaire. Nous avons vu de nombreux étudiants créatifs et prêts à s'investir dans ces sujets ! » SR

EN BREF

Hackadem Sup' le challenge



191 projets



391 participants



88 écoles



5 équipes finalistes

Thèmes imposés



La data et ses ressources



La performance en milieu complexe



Le développement durable

A SAVOIR

Hackadem est une marque de concours d'innovation déposée par le CEA en 2020.

PLATEFORME DE R&D

Un véhicule expérimental autonome

Le CEA-List se dote d'un véhicule autonome qui devient, entre ses mains, un véritable banc de développement pour que chercheurs et partenaires industriels inventent la mobilité connectée et autonome de demain.

Aiguillonnée par les transitions numérique et énergétique, la mobilité fait face à d'importantes transformations. Avec la multiplication des fonctionnalités au sein des véhicules, le nombre de capteurs et de calculateurs embarqués explose. Conséquences : une complexification des architectures électrique et électronique ainsi que l'accroissement de l'empreinte environnementale de ces dispositifs, contre lesquels il s'agit de lutter.

Une innovation de rupture

Entre 2016 et 2019, la collaboration du CEA-List et de l'alliance Renault-Nissan-Mitsubishi a permis de développer une architecture révolutionnaire. Centralisée, évolutive, modulaire, efficace et orientée services, elle permet

d'intégrer sur un même calculateur tous types de fonctions (allant des aides à la conduite, importante pour la sécurité, aux services de divertissement). Cette innovation de rupture a donné naissance en 2020 à la start-up Alkalee. Elle s'apprête aujourd'hui à être embarquée dans un véhicule de la société StreetDrone, avec le soutien de Carnauto, réseau de 9 instituts Carnot en support de la filière automobile et de la mobilité terrestre. L'objectif est de mettre à disposition des chercheurs et des industriels une plateforme de développement, de tests et de validation de logiciels embarqués, de capteurs, mais aussi de prototypage et de déploiement de technologies pour la perception de l'environnement des véhicules connectés et autonomes de demain. AG

ATTRACTIVITÉ

Le CEA à Choose France

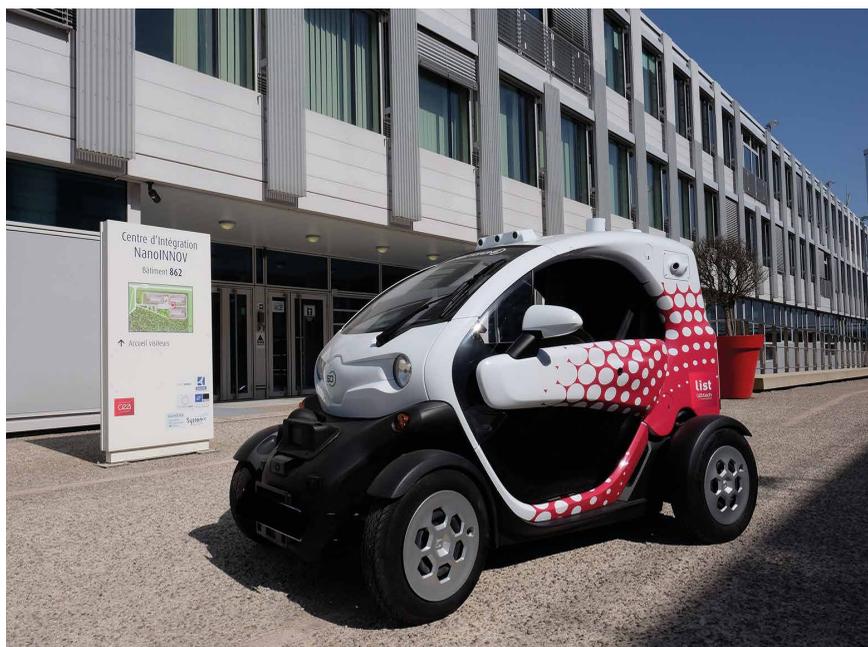
Cent cinquante dirigeants de grands groupes mondiaux, dont une cinquantaine de français, étaient conviés au sommet *Choose France* le 28 juin dernier à Versailles. Parmi eux, François Jacq, administrateur général du CEA. Présidé par Emmanuel Macron, l'événement avait pour objectif de promouvoir l'attractivité économique de la France et de convaincre de grandes entreprises étrangères de s'y implanter et investir. L'occasion d'annoncer 22 nouveaux projets d'investissements étrangers, en large part tournés vers l'innovation (batteries électriques, télécommunications, réalité augmentée, transport, nucléaire, santé, alimentation...) et représentant un montant de 3,5 milliards d'euros. SR

LABORATOIRE COMMUN

Accord franco-allemand

Aidas est un nouveau laboratoire virtuel commun créé par le CEA et le FZJ (Forschungszentrum Jülich).

Soixante-dix scientifiques vont œuvrer ensemble pour faire progresser la simulation numérique en Europe, en travaillant sur l'intelligence artificielle, l'informatique quantique et le calcul haute performance. Au programme : développer des codes d'application dans des domaines scientifiques sélectionnés (sciences des matériaux, énergie, neurosciences) ; explorer les avantages potentiels des architectures informatiques nouvelles et future ; et favoriser des synergies interdisciplinaires pour l'utilisation de méthodes et d'algorithmes génériques dans un contexte exascale, celui du milliard de milliards de calculs par seconde. SR

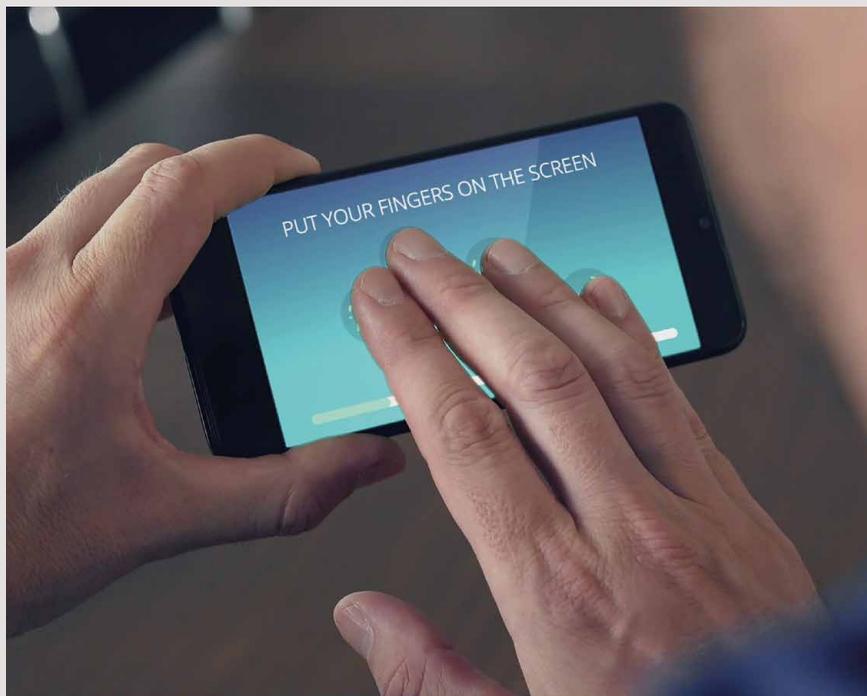


LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Isorg et ses capteurs d'empreintes digitales géants

« Posez votre index n'importe où sur l'écran pour déverrouiller votre téléphone. » Voilà une consigne qui pourrait bientôt devenir réalité, grâce à un capteur d'empreintes digitales de grande surface posé sous l'écran. « Isorg est la seule société au monde proposant cette fonctionnalité », commente Nicolas Bernardin, directeur du développement commercial. La start-up, issue du CEA-Liten, exploite l'électronique organique imprimée. À la différence de la gravure sur silicium, des encres composées de polymères semi-conducteurs sont déposées sur tout type de surface (verre, plastique, etc.), via des techniques d'impression transformant le verre ou le plastique en capteur d'images. Et ce de manière bien moins onéreuse que les procédés classiques. Isorg cible deux marchés principaux : les smartphones et la sécurité via l'identification de 1 à 4 doigts. Fin,



© Isorg

léger et résistant aux chocs, le capteur d'Isorg devrait fortement intéresser les services de douane et de police : il peut s'insérer dans des dispositifs mobiles et offre d'excellentes performances même à l'extérieur, en lumière intense. « Et la solution "1 doigt" vient d'être validée par le FBI! », ajoute Nicolas Bernardin, qui rappelle qu'aucun capteur d'empreinte pour la sécurité ne peut être

commercialisé sans l'aval de cet organisme. « C'est d'ailleurs le premier capteur issu de la filière organique à obtenir ce label. Le second, reconnaissant jusqu'à 4 doigts, est en cours d'examen. »

La start-up, en phase de développement commercial avec les acteurs-clés de la planète sur ces deux marchés, lancera la fabrication en série de ses capteurs dès la fin 2021. ●

TECHNOLOGIE

Photodiodes organiques (issues de la chimie organique) à base de polymères, directement imprimées sur leur support (plastique, verre, etc.). Ces matériaux sont des semi-conducteurs, c'est-à-dire capables de convertir la lumière en signal électrique. Réalisées sur une matrice de transistors, les photodiodes deviennent des capteurs d'images.

MARCHÉS

Smartphones, tablettes... : déverrouillage, applications bancaires, applications personnelles de santé, etc.

Sécurité : contrôle d'accès (sites sensibles, sécurisés, aéroports...), passeport biométrique, vote électronique, etc.

DATES-CLÉS

2010
Création d'Isorg

2012
Ouverture d'une ligne pilote avec le CEA-Liten

2014
Levée de 8 millions d'euros

2017
Réception de l'usine de production de Limoges

2018
Levée de 24 millions d'euros

2020
Fin du transfert technologique sur Limoges

2021
Capteur FAPI0 (1 doigt) certifié par le FBI
Levée de 16 millions d'euros



Ci-dessus

Capteur d'empreintes 4 doigts d'Isorg intégré à un smartphone.



CEA-Liten

Institut d'innovation sur les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).

→ www.isorg.fr



Suivez #CEA_Officiel

