

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

198

Avril 2015



▶ **GRAND ANGLE**

LE BÂTIMENT FAIT SA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

▶ **COUP DE PROJECTEUR**

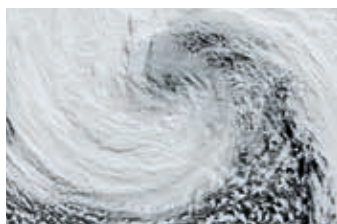
LIRE LE TEMPS DANS LES ONDES ATMOSPHÉRIQUES

▶ **TOUT S'EXPLIQUE**

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

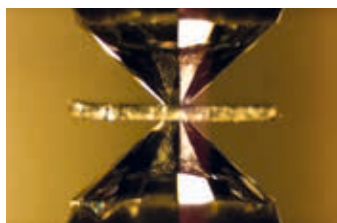


03 ACTUALITÉ



06 COUP DE PROJECTEUR

Lire le temps dans les ondes atmosphériques



08 À LA POINTE

Sensibilité du climat aux activités humaines : ça se précise! 08
 Valoriser le CO₂ grâce aux bactéries 09
 De l'art de traiter les molécules organiques contaminées 09
 Capture d'hydrogène sous haute pression 10
 Quelle mouche a piqué la chaîne alimentaire? 11

12 TOUT S'EXPLIQUE

L'économie circulaire.

14 GRAND ANGLE
Le bâtiment fait sa transition énergétique. En France, le bâtiment est le secteur le plus énergivore, entraînant 25% des émissions de CO₂. À l'Ines, le CEA-Liten et ses partenaires industriels imaginent des solutions pour la rénovation et l'implémentation d'une gestion efficace de l'énergie dans ce domaine.



22 À VOIR, À LIRE, À ÉCOUTER

Le CEA dans les médias 22
 Kiosque 23
 Sur le Web 23

ABONNEMENT GRATUIT

Vous pouvez vous abonner sur : www.cea.fr/le_cea/publications, ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse et profession à *Les Défis du CEA - Abonnements*. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.



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

VALORISATION

L'OFFRE TECHNOLOGIQUE DU CEA EN ITINÉRANCE



Fort du succès de son showroom Grenoblois, CEA-Tech a développé une version mobile de cet outil de valorisation et de promotion des savoir-faire et compétences de ses instituts Leti, Liten et List. Créé sous l'impulsion de Jean Therme, directeur de la recherche technologique du CEA, ce showroom itinérant a vocation à voyager partout en France, notamment dans les plateformes régionales de transfert technologique (PRTT) de CEA-Tech à Toulouse, Metz, Nantes, Bordeaux et Cadarache. **Objectif : présenter à des interlocuteurs industriels et publics, potentiels partenaires, l'offre technologique de CEA-Tech sur 11 thématiques** (voir marge). « Grâce à des démonstrateurs scénarisés, le showroom permet de donner un aperçu concret du type d'innovation qui pourrait résulter d'une collaboration avec le CEA » explique Philippe Brinard, de la direction Offres Innovation et Communication du CEA-Tech. Pour les PRTT, l'idée est également de conforter les collectivités régionales dans leur soutien à CEA-Tech en montrant la capacité de l'organisme à diffuser les technologies clés génériques aux entreprises du tissu industriel local. Imaginé par la société Superlab, à l'instar de celui de Grenoble, le showroom itinérant est composé de plancher et de mobilier qui s'imbriquent comme des legos ! Modulable à souhait, il peut ainsi occuper de 18 à 150 m² et s'adapter à tous les types d'espace, pour présenter jusqu'à 28 démonstrateurs technologiques emblématiques.

Élaborés par des concepteurs et designers de CEA-Tech, ces démonstrateurs, dont un quart sera renouvelé tous les ans, sont mis en valeur par une scénarisation intégrant l'histoire de leur création, leur application, leur transfert et des témoignages de partenaires.

Les 11 thématiques CEA-Tech présentées sur le showroom itinérant :

- filière hydrogène ;
- stockage et gestion de l'énergie ;
- diagnostic et fiabilité ;
- interface homme-machine ;
- matériaux, intégration et fonctionnalisation ;
- production d'électricité ;
- systèmes de vision et d'imagerie ;
- récupération d'énergie ;
- communication et protocoles ;
- matériaux, intégration, fonctionnalisation ;
- capture de mouvements

Contact : showroomceatech@cea.fr



◀ Le showroom itinérant a notamment séjourné au salon SEMICON Europa à Grenoble (en haut), au Salon Osons la France à Paris (gauche) et sur la PRTT de CEA Tech à Nantes.

PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

LE CEA, 1^{er} ORGANISME PUBLIC DE RECHERCHE DÉPOSANT DE BREVETS EN EUROPE

L'Office européen des brevets (OEB) publie le palmarès 2014 des principaux déposants de brevets en Europe. Avec 558 brevets publiés, le CEA garde sa position de leader des organismes publics de recherche et gagne une place, par rapport à 2013, dans le classement global en occupant la 32^e position. Il est le troisième déposant français de ce classement après Alcatel-Lucent et Technicolor. Un résultat qui illustre bien la politique volontariste du CEA en matière de propriété intellectuelle ! Les nombreux brevets prioritaires du CEA déposés chaque année, principalement en France, font l'objet d'extensions géographiques, qui définissent le territoire global sur lequel l'invention est protégée. À cet égard, la zone Europe est stratégique pour le CEA : la quasi-totalité de son portefeuille y est étendu par le biais de dépôts devant l'OEB. Les principaux domaines de recherche concernés par les

558 brevets du CEA publiés en 2014 sont la microélectronique, les nouvelles technologies de l'énergie, la robotique, l'instrumentation, la santé et les matériaux.



LEVÉE DE FONDS

LA ROUTE DE L'HYBRIDATION BATTERIE/HYDROGÈNE MÈNE À HYWAY



Kangoo hybride de Symbio FCell.

Pour sa première phase de développement, le projet Hyway décroche des financements de la région Rhône-Alpes, grâce au Fonds européen de développement régional (Feder). Inscrit dans le plan national d'implémentation du consortium Mobilité Hydrogène France, Hyway vise à déployer une flotte de cinquante véhicules utilitaires hybrides batteries/hydrogène à Lyon et à Grenoble. Une ambition qui implique également l'implantation d'une station de distribution d'hydrogène dans chacune de ces villes.

Partenaire actif du projet, le CEA-Liten reçoit un peu plus de 100 000 euros pour assurer le suivi des usages et des performances des deux stations, et des Kangoo, fournies par la société Symbio FCell. Plus exactement les chercheurs procéderont à l'analyse des données de roulage afin d'étudier le comportement et la perception de l'utilisateur dans l'utilisation de véhicules hybrides. Le suivi des performances servira à optimiser les technologies intégrées aux Kangoo et à préparer les prochaines générations. D'ici deux ans, le CEA participera aussi à la seconde phase de Hyway pour alimenter les stations, non plus en hydrogène issu des énergies fossiles, mais en hydrogène décarboné.

TEXTO

Le climat à l'heure de la dernière déglaciation

La compréhension et la simulation de l'évolution du « système Terre » dans un contexte de changement climatique rapide sont au cœur du projet FATES¹. Récemment lancé à Gif-sur-Yvette par la fondation BNP-Paribas, ce projet du LSCE porte précisément sur l'étude du climat lors de la dernière déglaciation. Il y a 20 000 à 10 000 ans, ce réchauffement climatique naturel était associé à une augmentation des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi qu'à une élévation du niveau des mers.

FATES inclura le développement de modèles et de méthodes de datation ainsi que des reconstitutions climatiques à haute résolution. Au-delà de ces recherches, il constitue un observatoire sur la manière de construire l'interdisciplinarité, notamment entre les sciences sociales et les sciences « dures ». Il comporte également un volet de formation à la gestion de projet.

Note:

1. Fast climate changes, new Tools to understand and simulate the evolution of the Earth System.



© CEA

INTERVIEW

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne,
directeur de l'Institut de Technico-économie des systèmes énergétique (I-tésé) du CEA

LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Quel peut être l'impact économique de la transition énergétique ? Une question complexe à aborder, notamment du point de vue de la dynamique des actions engagées et de l'état de maturité technologique et sociale des solutions à mettre en œuvre... Le point avec le directeur du CEA-I-tésé.

Un récent rapport du GIEC évalue autour de 1 000 milliards d'euros le montant que pourrait coûter, à la planète, le réchauffement climatique d'ici la fin du siècle. Qu'en est-il ?

Il est certain que le réchauffement climatique va peser sur divers secteurs économiques, comme l'industrie ou le secteur résidentiel. Il faut également examiner le cas de l'agriculture : si la température globale augmentait de 2,5 °C d'ici à 2100, les productions céréalières baisseraient significativement chaque année sous nos latitudes.

Mais comment évaluer le coût de l'exode des populations menacées par les épisodes climatiques extrêmes (inondations, sécheresses) ou l'élévation du niveau des mers ? De même, quels sont les impacts sur les ressources en eau, la dégradation des infrastructures ? Le calcul précis du réchauffement climatique est complexe car nombreux sont les paramètres à prendre en compte. Les ordres de grandeur des études disponibles vont de quelques pourcents jusqu'à quelques dizaines de pourcents de la valeur ajoutée mondiale à la fin du siècle. Et, nous avons encore peu de visibilité sur les orientations stratégiques des pays. Certes, les objectifs sont connus au niveau européen avec la règle des « 3 x 20 »¹, les objectifs pour 2030 ainsi que la diminution des émissions de gaz effet de serre d'un facteur 4. Mais leurs effets dépendent aussi de la dynamique de la transition énergétique et de l'état de maturité technologique et social des solutions à mettre en œuvre. C'est ce qu'il nous faut affiner.

Ce sont ces analyses que vous menez au sein de l'Alliance Ancre² ?

En effet, nous avons élaboré trois scénarios (voir encadré), analysés selon des critères économiques, stratégiques, environnementaux, sociaux, scientifiques et techniques.

Certaines tendances se dessinent même si elles dépendent des visions de court ou de long termes des actions engagées. Dans tous les cas de figure, il apparaît que la transition énergétique nécessitera des investissements conséquents. Mais, pour reprendre les termes du Rapport Stern³, le coût d'un réchauffement climatique laissé à la dérive serait bien plus lourd que celui des parades qui, elles, sont porteuses de perspectives économiques. Par exemple, la « décarbonisation » de la France lui permettrait, d'ici une vingtaine d'années, d'économiser une large part du montant de ses importations en ressources fossiles (une cinquantaine de milliards d'euros par an). De même, les ruptures technologiques nécessaires sont une excellente opportunité pour l'Europe et la France de se positionner en leader.

Quelles sont les opportunités économiques et industrielles de la transition énergétique ?

Le gouvernement a estimé à 100 000 le nombre d'emplois que pourrait générer d'ici trois ans la transition énergétique. Mais gagner cette partie implique, à moyen terme, de changer les comportements, orienter les décisions en faveur de transports et de logements plus écologiques et mobiliser la recherche de façon accrue. Nous travaillons dans ce sens, par exemple avec la Chambre de commerce et d'industrie de l'Essonne dont 22 % des membres ont entamé une démarche de transition énergétique. 35 % ont réalisé une analyse de leur consommation qui a permis à 75 % d'entre elles de réaliser des économies. Il faut continuer sur cette lancée, généraliser cette prise de conscience et se donner les moyens de la concrétiser grâce aux innovations. Ce à quoi s'emploie le CEA.

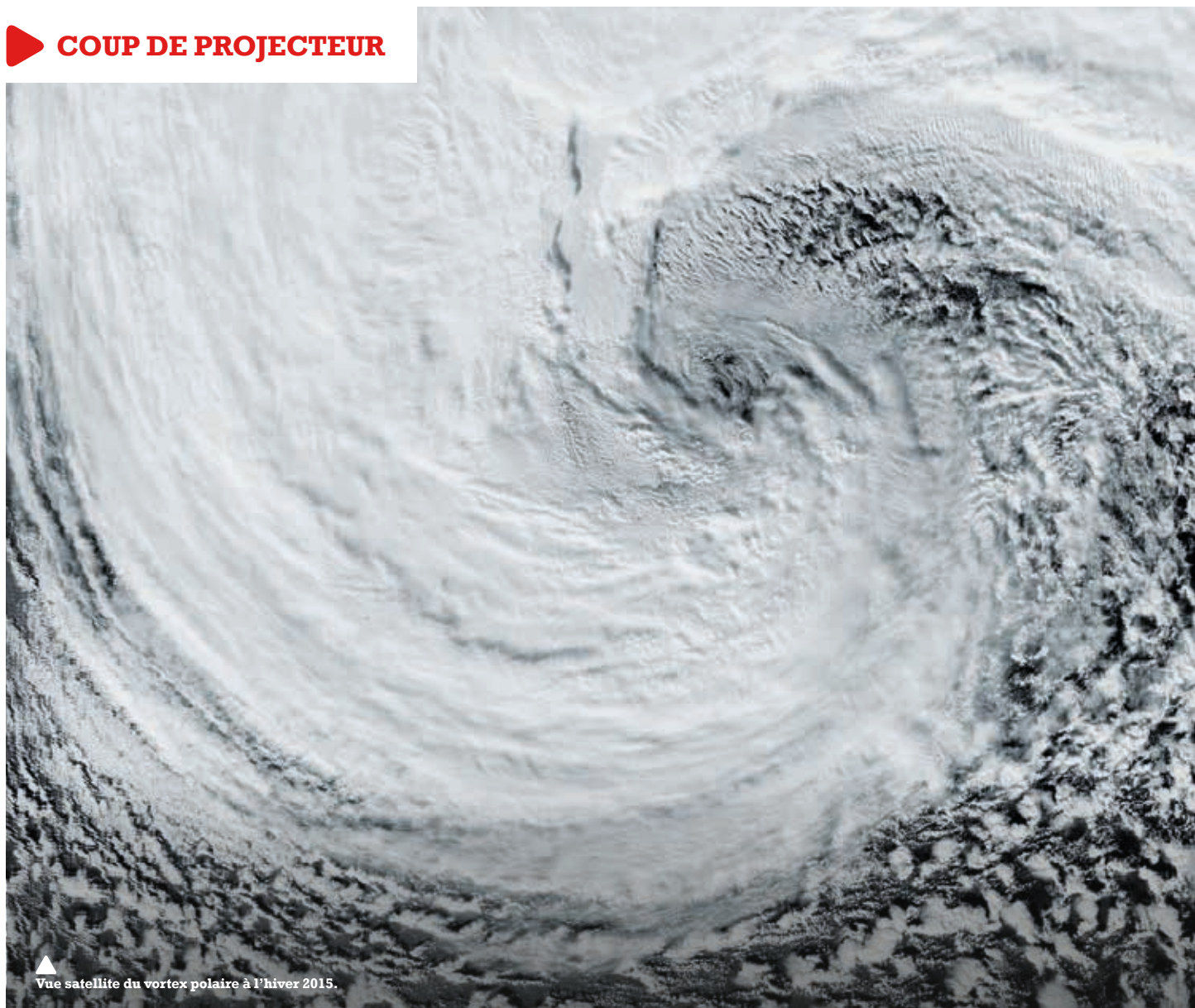
Propos recueillis par Aude Ganier

LES 3 SCÉNARIOS DE L'ANCRE DES DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES REQUIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

- **SOB pour Sobriété renforcée** - Triptyque sobriété/efficacité énergétique/ développement de la part des renouvelables. Verrou technologique principal : captage et stockage du CO₂.
- **ELE pour Décarbonation par l'électricité** - Modèle basé sur la sobriété et l'efficacité énergétique avec un rôle central pour l'électricité d'origine renouvelable et nucléaire. Rupture technologique : stockage massif de l'électricité.
- **DIV pour Vecteurs diversifiés** - Mix s'appuyant sur l'efficacité énergétique, la limitation des usages électriques et le recours à de nouveaux vecteurs (bio-énergies, réseaux de chaleur...). Technologies innovantes : chauffage urbain par récupération de la chaleur fatale (dont celles des centrales nucléaires).

Notes :

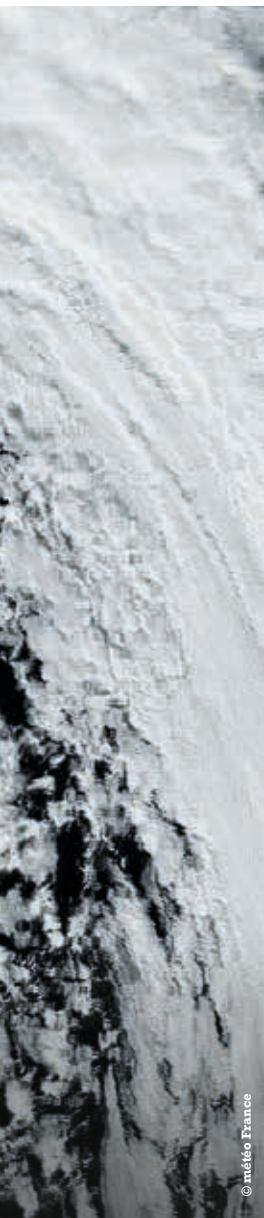
1. Les 3 x 20 : réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre, atteindre 20 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, réaliser 20 % d'économies d'énergie.
2. Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie.
3. Rapport sur l'économie du changement climatique de Nicholas Stern publié en 2006.



▲
Vue satellite du vortex polaire à l'hiver 2015.



▲
Vue des chutes du Niagara, complètement gelées en ce début 2015.



© météo France



© Aaron Harris

LIRE LE TEMPS DANS LES ONDES ATMOSPHÉRIQUES

Utiliser le réseau de surveillance des ondes infrasonores caractéristiques des essais nucléaires pour étudier les ondes atmosphériques naturelles et, à terme, prévoir leur impact sur la météorologie. C'est l'idée du projet Arise, piloté par le CEA-DAM.

Hiver 2013. Une vague de froid paralyse une bonne partie de l'Europe de l'ouest ainsi que les États-Unis. En cause? L'affaiblissement du **vortex polaire** qui, en temps normal, retient les masses d'air froid. Cette perturbation est elle-même la conséquence d'une série de phénomènes atmosphériques, mettant en jeu des ondes planétaires et des ondes de gravité qui peuvent transférer de l'énergie dans la **stratosphère** et la **mésosphère**.

« Dans le cas du vortex polaire, ces ondes ont pu être produites par des phénomènes tels que des orages tropicaux, le vent sur les montagnes, les **courants-jets**, les contrastes thermiques entre les terres et les océans. Elles pénètrent ensuite dans la stratosphère et affaiblissent le vortex en le réchauffant aux hautes latitudes. Son effondrement perturbe alors la circulation du jet **troposphérique**, pouvant entraîner des vagues de froid aux moyennes latitudes » détaille Elisabeth Blanc, directrice de recherche au CEA-DAM¹ et coordinatrice du projet international Arise. C'est dire l'importance que ces ondes revêtent dans la compréhension de l'atmosphère et du climat de notre planète.

Prévoir la météo à plusieurs semaines et améliorer les modèles climatiques

« L'idée du projet Arise est de créer une plateforme européenne de recherche sur l'atmosphère en rassemblant des données complémentaires : réseaux de surveillance infrasonore, radars, lidars, mesures satellitaires... », indique Elisabeth Blanc. À l'origine du projet : la mesure en continu des ondes infrasonores par le réseau international de surveillance mis en place dans le cadre de la vérification du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires. À moyen terme, il sera constitué de soixante stations uniformément réparties sur le globe. « Si ce réseau est d'abord dédié à la détection des ondes produites dans l'atmosphère par les explosions nucléaires, il peut aussi servir à étudier les ondes atmosphériques et les perturbations naturelles dans une gamme d'échelles spatio-temporelles très étendues », précise Elisabeth Blanc. L'enjeu est alors de taille car, en intégrant ces ondes dans les modèles d'atmosphère, les scientifiques espèrent étendre les prévisions météorologiques à plusieurs semaines ! Les données archivées pourraient aussi être utilisées pour améliorer les modèles climatiques. « L'assimilation de toutes ces nouvelles données dans des modèles qui n'ont pas été conçus pour les prendre en compte n'est pas aisée, conclut Elisabeth Blanc. Mais le projet Arise, récemment prolongé pour trois ans, avance bien. Les modèles expérimentaux et les données multi-technologiques devraient permettre de lever ces difficultés pour proposer une nouvelle génération de modèles d'atmosphère et de climat avec des applications civiles très importantes. »

Fabrice Demarthon

- **Vortex polaire :** vaste courant circulaire situé dans la stratosphère de l'hémisphère nord.
- **Stratosphère :** couche atmosphérique entre la tropopause (8 et 15 km) et 50 km d'altitude.
- **Mésosphère :** couche atmosphérique entre 50 km et 80 km d'altitude.
- **Courant-jet :** courant d'air rapide et confiné entre la troposphère et la stratosphère.
- **Troposphère :** couche atmosphérique entre le sol et la tropopause.

Note :

¹ Département analyse, surveillance, environnement (DASE).

CLIMATOLOGIE

SENSIBILITÉ DU CLIMAT AUX ACTIVITÉS HUMAINES : ÇA SE PRÉCISE !

Certains que les émissions de CO₂ dans l'atmosphère continueront de croître d'ici à 2030, les climatologues affirment que les modèles simulant la sensibilité du climat aux activités humaines réduiront pour moitié leurs incertitudes. Une conclusion établie par une collaboration internationale associant le LSCE.

• **Forçage radiatif :** quantification de l'influence d'un facteur de changement climatique (gaz à effet de serre, aérosols...) sur le bilan énergétique terrestre, soit la différence entre l'énergie radiative reçue (rayons solaires) et l'énergie radiative émise (rayons infrarouges).

• **Sensibilité du climat :** variation de température à la surface de la planète pour un forçage radiatif donné. Il permet de quantifier l'évolution du climat en fonction des émissions de CO₂.

• **Bilan énergétique (ou radiatif) terrestre :** différence entre l'énergie solaire absorbée par l'atmosphère et les surfaces terrestres, et l'énergie (rayonnement infrarouge) émise par la Terre.

Le CO₂ et les aérosols sont les deux émissions principales liées aux activités humaines. Mais leurs effets sont antagonistes : d'un côté, le CO₂ réchauffe la Terre en participant à l'effet de serre (**forçage radiatif** positif) ; de l'autre, les aérosols induisent un refroidissement de la planète par effet d'albédo. Les modèles climatiques qui prennent en compte ces deux phénomènes ne permettent toutefois pas de déterminer précisément dans quelle proportion les aérosols compensent le réchauffement provoqué par le CO₂. « Si l'influence du CO₂ atmosphérique sur le climat est claire et bien modélisée, les relations entre les aérosols et les évolutions climatiques sont, par contre, mal maîtrisées » explique François-Marie Bréon, climatologue au LSCE. Ce manque de précision empêche de donner une valeur expérimentale de la **sensibilité** du climat face aux activités humaines, en se basant uniquement sur les mesures à disposition. Toutefois, cette incertitude devrait s'estomper à en juger une étude internationale impliquant des chercheurs du LSCE.

Quand l'impact du CO₂ l'emporte sur celui des particules fines

En effet, les scientifiques sont partis d'un constat : depuis l'ère industrielle, le taux de CO₂ n'a cessé d'augmenter

tandis que les émissions d'aérosols ont diminué sur les dernières décennies, grâce notamment aux mesures politiques prises en Europe et aux États-Unis. D'ici à 2030, les chercheurs s'attendent à ce que cette tendance se poursuive. « Ainsi, le CO₂, facteur dont on connaît l'impact, va avoir une contribution de plus en plus dominante sur le changement climatique. En revanche, les concentrations en particules fines vont avoir de moins en moins d'influence, diminuant par là même les incertitudes dans la quantification de l'impact global des activités humaines sur le **bilan énergétique terrestre** » indique le climatologue. En testant plusieurs scénarios, les scientifiques ont montré une réduction allant jusqu'à 50 % de cette incertitude dans la réponse climatique, d'ici à 2030. Et ce, sans considérer l'amélioration de la compréhension scientifique du fonctionnement du climat.

Amélie Lorec



Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (unité mixte CEA/CNRS/Université de Versailles-Saint-Quentin), membre de l'Institut Pierre Simon Laplace.



© Philippe Huguen

VALORISER LE CO₂ GRÂCE AUX BACTÉRIES

Des chercheurs du CEA-IBEB mettent à jour le mécanisme par lequel des bactéries transforment le CO₂ capté dans l'atmosphère en acide formique. Une piste pour valoriser ce gaz à effet de serre dans des applications bas carbone...

Certains enzymes bactériennes, les FDH¹, transforment naturellement le CO₂ en acide formique, composé utilisé pour alimenter des piles à combustible ou stocker de l'hydrogène. Avant d'exploiter ce don de la nature, le mécanisme d'activation des FDH pour convertir le CO₂ reste à décrypter. En effet, l'enzyme n'est active que si son centre actif, constitué d'un **cofacteur**² à molybdène, est sulfuré. Mais, comment récupère-t-il le soufre ? « *Nous avons découvert l'implication d'une protéine chaperon qui fixe le cofacteur à molybdène d'un côté et une protéine donneuse de soufre de l'autre. Le soufre passe alors de l'un à l'autre par un tunnel présent dans la protéine chaperon pour se fixer sur le cofacteur, puis sur le site actif de la FDH* » explique David

Pignol, chercheur du CEA-IBEB qui participe à l'étude². Ce mécanisme, démontré chez *Escherichia coli* pourrait s'avérer similaire chez d'autres bactéries.

Amélie Lorec

CEA - IBEB

Institut de biologie environnementale et biotechnologie, spécialisé dans l'étude de l'adaptation aux stress environnementaux, polluants métalliques et rayonnements ionisants, et dans la production de molécules à forte valeur ajoutée.

• **Cofacteur** : substance chimique non protéique, liée à une protéine et nécessaire à l'activité biologique de cette dernière.

Notes :

1. Les formiates déshydrogénases.

2. Avec le CNRS et Aix-Marseille Université.

DE L'ART DE TRAITER LES MOLÉCULES ORGANIQUES CONTAMINÉES

OHT, pour oxydation hydrothermale : ce procédé conçu et mis en œuvre par des équipes du CEA-DEN s'avère très efficace pour traiter les effluents organiques contaminés des installations de traitement du combustible usé.



Travail sur le réacteur OHT (à l'intérieur des boîtes à gants) d'Atalante..

L'approche vertueuse du cycle fermé du nucléaire permet aux industriels de traiter le combustible usé pour valoriser ses matières d'intérêt et minimiser la toxicité et le volume des déchets ultimes. Les procédés chimiques très innovants développés, en grande partie par les équipes du CEA-DEN, génèrent toutefois des effluents. Là encore, les experts du CEA innovent avec un procédé d'oxydation hydrothermale conçu à Marcoule et mis en œuvre au sein d'Atalante¹. « *En décembre dernier, nous avons franchi une étape importante avec le démarrage effectif du procédé. En traitant avec succès un litre de*

solvants organiques contaminés issus d'une cuve de l'INB 35^e de Saclay, le procédé OHT a démontré sa pertinence et son efficacité pour permettre, dans les années à venir, de traiter et détruire ce type d'effluents » annonce Christophe Poinssot, chef de Département au CEA-DEN.

L'innovation repose sur l'utilisation d'**eau supercritique**[•] dans laquelle les solvants organiques subissent l'OHT et sont détruits en moins d'une minute : les solvants se transforment en une phase gazeuse (CO₂) non contaminée et en une phase liquide (H₂O) concentrant les radioéléments initialement présents ; cette dernière peut alors être traitée dans des installations dédiées alors que les solvants organiques ne pouvaient pas l'être. « *Le procédé a l'avantage de n'utiliser aucun autre réactif chimique que de l'eau, et repose uniquement sur la forte solubilité et la réactivité des composés organiques dans cette eau supercritique* » ajoute le chercheur dont les équipes travaillent à présent à la montée en puissance de l'OHT.

Aude Ganier

CEA - DEN

Direction de l'énergie nucléaire dont les programmes, conduits à la demande de l'État ou des industriels, sont liés aux grands enjeux du développement de l'énergie nucléaire, via notamment les recherches sur la 4^e génération de réacteurs.

• **Eau supercritique** : état de l'eau soumise à une température supérieure à 374 °C et à une pression supérieure à 218 bars, qui acquiert des propriétés nouvelles dont celle d'être un puissant solvant pour presque tous les composés organiques.

Notes :

1. Laboratoire Delos d'Atalante.

2. Station de traitement et d'entreposage des effluents liquides radioactifs.

MATÉRIAUX

CAPTURE D'HYDROGÈNE SOUS HAUTE PRESSION

Prenez de l'azote, ajoutez-y une pincée d'hydrogène moléculaire et soumettez le tout à des pressions titanesques : vous obtiendrez des structures capables de stocker de l'énergie ou de l'hydrogène. Une découverte fondamentale du CEA-DAM qui ouvre des perspectives.

Pour être fondamentale, l'étude¹ n'en est pas moins riche en perspectives. Associant le CEA, elle a permis de découvrir des composés à fort potentiel pour le stockage à haute densité de l'énergie ou à forte capacité de l'hydrogène. Et ce, en soumettant, dans des **cellules à enclume de diamant**[•], des mélanges d'azote et d'hydrogène moléculaires à des pressions autour de 50 000 fois la pression atmosphérique. Les scientifiques ont ainsi obtenu des structures inédites de type « clathrates » : des cages d'azote moléculaires enserrant des molécules d'hydrogène².

En augmentant ensuite la pression, une transformation chimique est observée avec l'apparition d'un mélange d'ammoniac et d'**hydrazine**[•]. Cette méthode, qui ne fait appel à aucun catalyseur, montre que la pression favorise une auto-organisation de la matière qui ouvre la voie à la synthèse de matériaux par des procédés « propres ».

qui a participé à l'étude : « au-delà d'un million d'atmosphères, l'azote se polymérise en formant des longues chaînes à même de stocker des quantités phénoménales d'énergie. Au-delà de quatre millions d'atmosphères, l'hydrogène se transformerait en une sorte de "super-supraconducteur", métal pouvant conduire de l'électricité sans perte, à température ambiante. »

D'où l'intérêt de déterminer à quoi pourrait mener la compression du mélange de ces deux molécules. C'est ce qu'ont réussi à faire les physiciens, sans aller dans le domaine des pressions extrêmes, en découvrant cette nouvelle classe de composés en forme de cage, dont il reste à évaluer l'intérêt industriel.

Vahé ter Minassian

CEA - DAM

Direction des applications militaires mandatée pour garantir la sûreté et la fiabilité de la dissuasion nucléaire française et contribuer à la surveillance du respect du Traité d'interdiction des essais nucléaires (Tice).

Sous pression, les composés révèlent des propriétés inédites

On le sait. La compression de certains éléments révèle des composés aux caractéristiques extraordinaires, telles que les présente Paul Loubeyre, chercheur au CEA-DAM

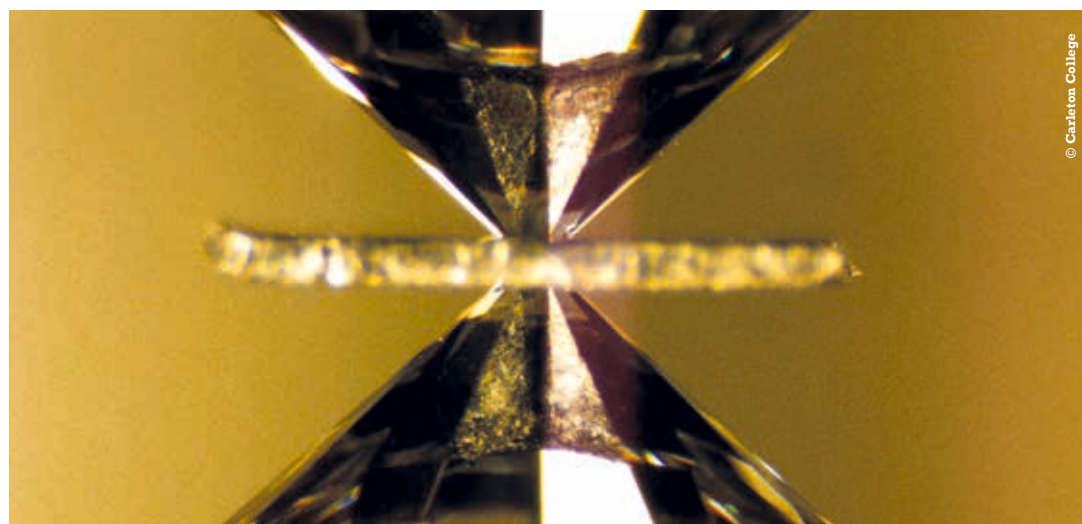
• **Cellules à enclume de diamant** : dispositif qui permet de soumettre un matériau à des pressions et températures très élevées. Des forces sont appliquées de part et d'autre de deux diamants, tandis que des rayons X sont projetés sur l'échantillon placé au centre pour être analysé.

• **Hydrazine** : composé chimique notamment utilisé comme carburant des fusées.

Notes :

1. Collaboration du CEA, du CNRS et des synchrotrons SOLEIL et ESRF.

2. Revue Nature Communications, décembre 2014.



© Carleton Collège

Zoom sur une cellule à enclume de diamant.

TEXTO

La biodiversité marine menacée

Près de 17 % des grands fonds sous-marins pourraient voir leur biodiversité affectée par l'acidification. Telle est la conclusion d'une étude internationale, associant le LSCE, qui a évalué l'impact possible des émissions de CO₂ sur la chimie des eaux de l'Atlantique Nord à l'horizon 2100. Les analyses de sept modèles climatiques ont notamment porté sur les projections de pH dans les eaux profondes (en dessous de 500 mètres), sachant qu'une diminution de 0,2 unité de pH affecterait significativement la biodiversité. Cette étude a permis de cartographier les grands fonds de l'Atlantique Nord pour lesquels le seuil jugé dangereux est dépassé. Dans le scénario le plus sévère, leur surface représente 17 % du total, 23 % des canyons profonds et 8 % des monts sous-marins, deux environnements abritant des écosystèmes à grande biodiversité.

BIOTECHNOLOGIES

QUELLE MOUCHE A PIQUÉ LA CHAÎNE ALIMENTAIRE ?

Des mouches pour nourrir les poissons : l'idée est excellente ! Surtout quand ladite mouche se nourrit de déchets d'abattoirs, ainsi valorisés. À condition bien sûr de garantir que ceux-ci ne présentent aucun risque vis-à-vis de l'ESB, ce dont se sont assurés les chercheurs du CEA-Imeti.

L'équation est catastrophique. D'un côté, les poissons d'élevage sont nourris avec d'autres poissons prélevés intensivement dans les mers. De l'autre, des millions de tonnes de sous-produits issus des abattoirs partent en fumée, notamment suite à l'interdiction des farines animales. Ce constat est au cœur du projet ANR Desirable qui étudie la possibilité, à l'échelle industrielle, de nourrir des animaux d'élevage avec des insectes. L'idée est pertinente car ces bestioles, riches en protéines et en matières grasses¹, font partie du régime alimentaire naturel des poissons ou volailles. De plus, elles peuvent être élevées dans une logique « durable », grâce au recyclage de matières organiques jusqu'alors considérées comme des déchets.

La mouche, un menu de choix, garanti sans risque

Pour alimenter les fermes piscicoles, les scientifiques s'intéressent à la larve de la mouche soldat noire *Hermetia illucens*, sans danger pour l'homme ni pour l'environnement. Omnivore, elle peut se nourrir de déchets d'abattoir, à condition que leur recyclage ne présente aucun risque, notamment vis-à-vis de l'ESB[•] et de ses agents, les prions. L'équipe² de Jean-Philippe Deslys du CEA-Imeti, qui a conçu en 1999 un test de l'ESB très sensible³, a ainsi développé des approches originales de décontamination. « La preuve de concept a mis en évidence l'intérêt de cette méthode empêchant

le recyclage des prions dans de nouveaux régimes alimentaires pour insectes. Nous l'avons ensuite optimisée afin de la rendre économiquement viable et parvenir à une nourriture optimale pour les larves de mouche », explique Férid Nassor, étudiant à Sup'Biotech actuellement en stage au CEA-Imeti. On n'en saura pas plus, secret industriel oblige...

Parallèlement, les partenaires optimisent les procédés de production des insectes et de suivi de leur développement. Après quoi, ils testeront la croissance des poissons nourris avec les larves et évalueront leurs qualités nutritionnelles et gustatives selon les différents régimes. Pour parfaire l'équation, d'autres scientifiques s'intéressent au pouvoir nutritionnel du ver de farine. De quoi concevoir, à terme, des bio-raffineries d'insectes. Et donc parfaire l'équation de la chaîne alimentaire de l'industrie agroalimentaire, dans le respect des réseaux trophiques[•] naturels !

Mathieu Grousson

CEA - Imeti

Institut des maladies émergentes et des thérapies innovantes dont les études portent sur la physiopathologie de ces maladies afin de comprendre de nouvelles fonctions biologiques et de définir de nouvelles approches.

• **ESB** : encéphalopathie spongiforme bovine, pathologie connue comme « la maladie de la vache folle ».

• **Réseau trophique** : ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent.

Notes :

1. Notamment en acides gras insaturés oméga-3 et oméga-6.

2. Service d'étude des prions et des infections atypiques.

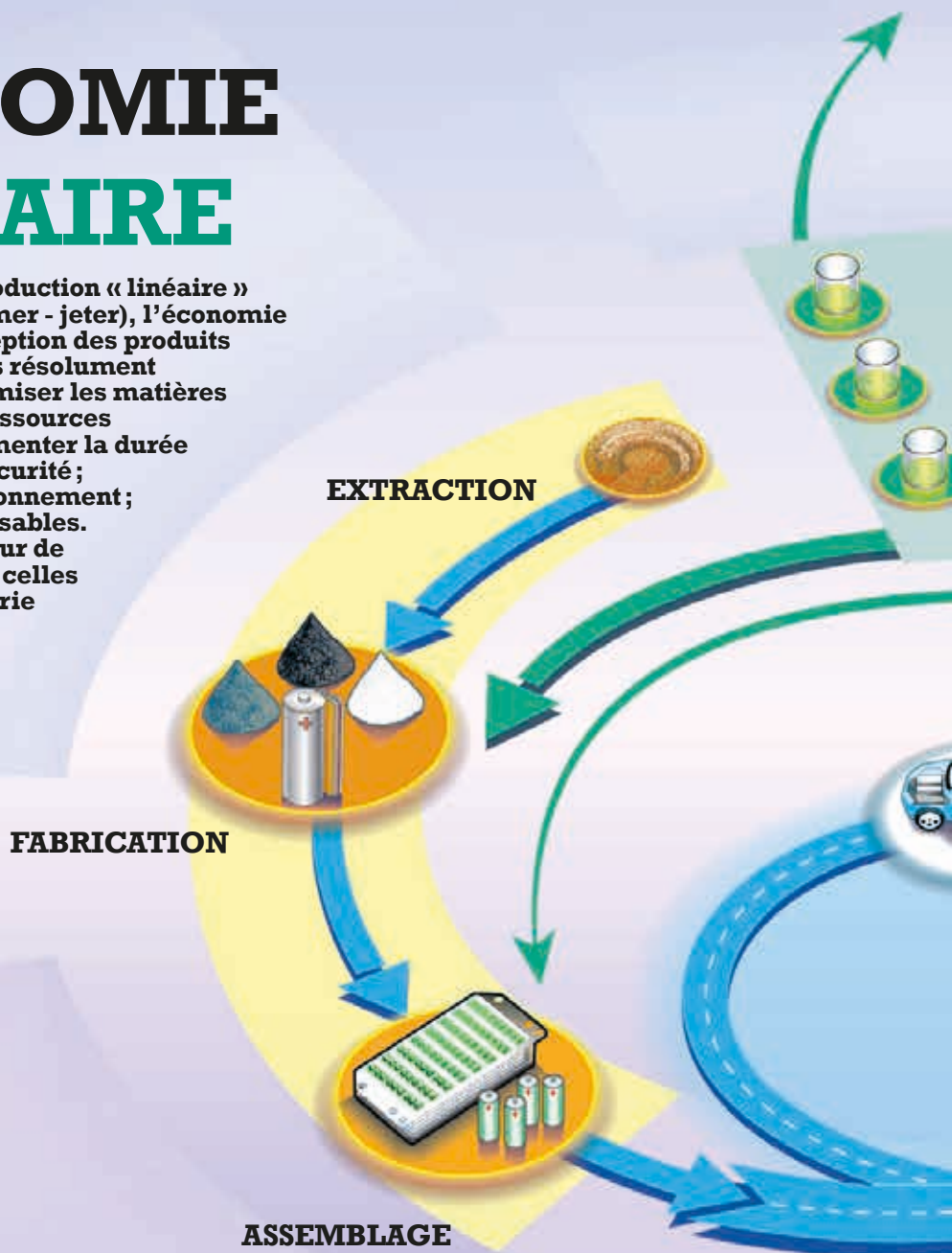
3. Test commercialisé par la société BioRad, sous licence CEA, utilisé au niveau mondial pour sécuriser la filière bovine.



◀ Le poisson archer crache un jet d'eau sur sa proie pour le déstabiliser, puis se régaler !

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Contrairement au mode de production « linéaire » (extraire - fabriquer - consommer - jeter), l'économie circulaire repose, dès la conception des produits et systèmes, sur des processus résolument « durables ». Objectifs : économiser les matières premières, les énergies, les ressources humaines et financières ; augmenter la durée de vie, la performance et la sécurité ; limiter les impacts sur l'environnement ; et recycler les éléments valorisables. Un cycle vertueux qui repose sur de nombreuses innovations, dont celles du CEA. Exemple avec la batterie d'un véhicule électrique.

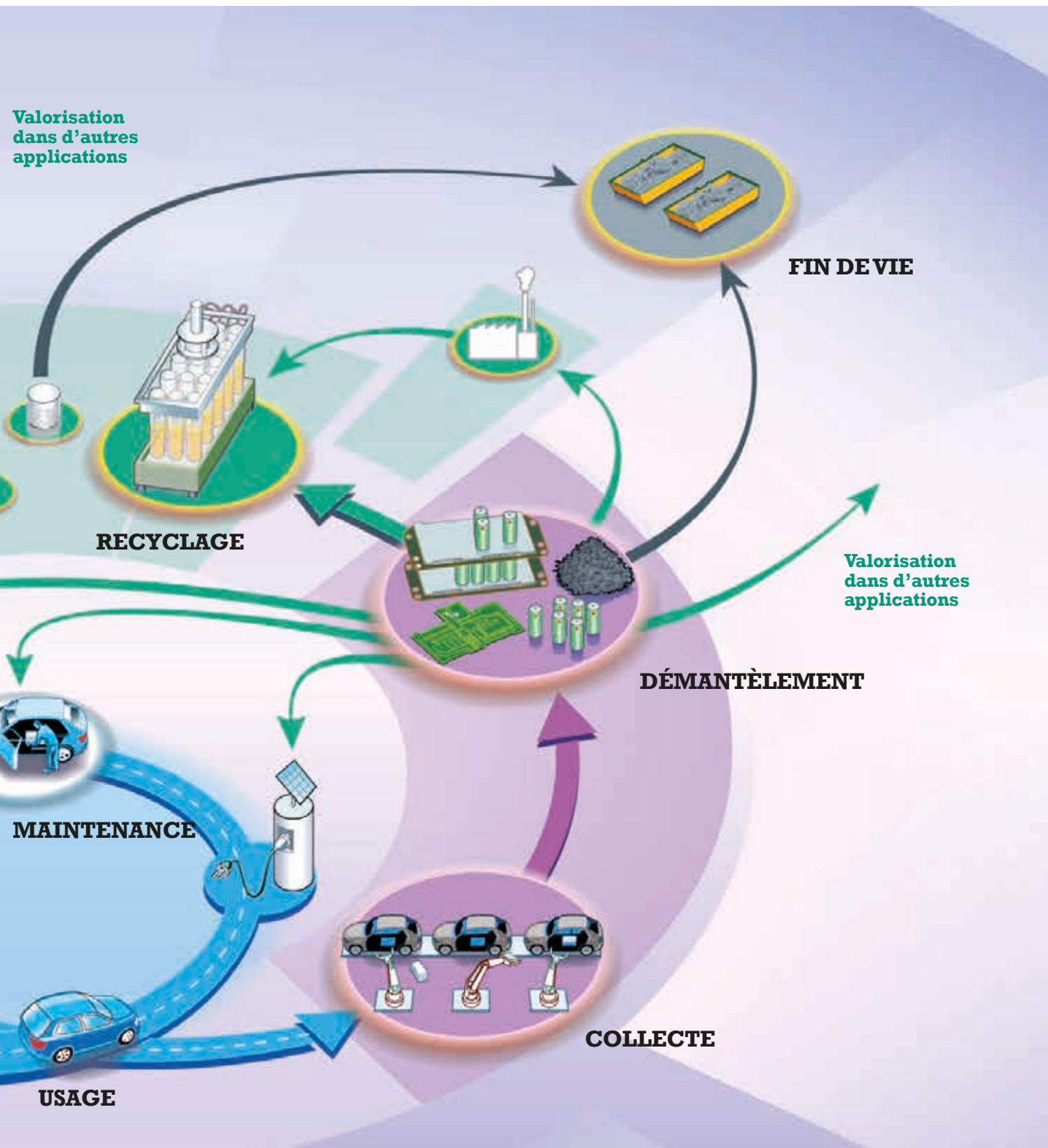


Éco-conception

- **Approvisionnement durable.** Extraction respectueuse de l'environnement des matières (lithium, fer, cobalt...) et emploi de matières recyclées.
- **Utilisation propre et économe des ressources.** Fabrication optimisée des accumulateurs avec plus d'éléments actifs (amélioration du stockage ions lithium...), des solvants de base aqueuse (moins polluants), des techniques « additives » (ajout plutôt que suppression de matière).
- **Anticipation du démantèlement.** Assemblage des accumulateurs en batterie selon des procédés facilitant leur désassemblage.
- **Réduction de l'empreinte carbonique.** Livraison dans des circuits courts via des modes de transport « doux » : fluvial, fret ferroviaire, électrique.

Éco-utilisation

- **Optimisation de la durée de vie.** Sollicitation non agressive de la batterie grâce à des logiciels de pilotage intelligent du véhicule tenant compte de plusieurs paramètres (état de charge de la batterie, vitesse du véhicule, dénivelé du trajet...).
- **Maintenance préventive et curative.** Surveillance en temps réel, grâce au système de gestion intelligente de la batterie, de la performance et de la sécurité des accumulateurs, par exemple pour que les défaillants soient déconnectés du système (qui continue de fonctionner) avant d'être réparés.



Éco-traitement

- **Collecte.** Récupération des batteries en fin de « première » vie, mise en sécurité et diagnostic de l'état de tous leurs modules.
- **Démantèlement optimisé.** Désassemblage mécanique des batteries avec des procédés limitant les pertes de matières.
- **Valorisation des modules viables.** Réintroduction des éléments, aux performances moindres, dans d'autres applications : complément au stockage stationnaire d'énergie solaire, alimentation de dispositifs portables...
- **Récupération des autres éléments.** Séparation mécanique selon trois alternatives : valorisation énergétique (par exemple par incinération), mise en décharge ou recyclage.

Éco-recyclage

- **Tri physique optimisé.** Séparation selon des familles de matériaux (métaux, plastiques, inorganiques) avec des techniques innovantes en termes de performances et de coûts : tri magnétique, par densité...
- **Séparation chimique poussée.** Extraction des matières d'intérêt par des procédés d'hydrométallurgie ou de pyrométallurgie conçus notamment pour réduire la génération de sous-produits polluants.
- **Valorisation des matières d'intérêt.** Réutilisation des éléments chimiques en tant que matière secondaire d'une nouvelle batterie ou d'autres dispositifs.
- **Mise en décharge des déchets ultimes.** Stockage dans des sites dédiés.

Infographie : Fabrice Mathé - Texte : Aude Ganier



LE BÂTIMENT FAIT SA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



▲ Capteurs solaires plans développés par le CEA-Liten et la société Clipsol pour alimenter des réseaux de chaleurs.



En dévorant plus de 40% de l'énergie consommée en France, dont près de 80 % pour les besoins thermiques, le bâtiment est le secteur le plus énergivore, devant les transports et l'industrie. Il représente également 25% des émissions de CO₂. C'est pourquoi, le CEA et ses partenaires industriels imaginent des solutions innovantes pour la rénovation et l'implémentation d'une gestion efficace de l'énergie d'un bâtiment, voire d'une ville. Réalisés dans le cadre du programme pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie du CEA, et dans un contexte de transition énergétique, les projets sont notamment menés par le CEA-Liten à l'Institut national de l'énergie solaire (Ines), en Savoie. Dossier réalisé par Amélie Lorec



**POSITIVER L'ÉNERGIE
DES BÂTIMENTS
DU FUTUR**

**RÉNOVATION :
L'INNOVATION
SUR MESURE**

**DES RÉSEAUX POUR
CHAUFFER LA VILLE**

POSITIVER L'ÉNERGIE DES BÂTIMENTS DU FUTUR

▶ Plateforme expérimentale de l'Ines comprenant les maisons Incas, les cellules Passys et les bancs tests sur toiture.



© P. Avallan / CEA

Fort de ses équipes du CEA-Liten, l'Institut national de l'énergie solaire travaille activement sur l'efficacité énergétique des bâtiments du futur, pour s'adapter aux évolutions de la réglementation à l'horizon 2020. Porteurs d'enjeux environnementaux, les projets menés ont notamment pour objectif d'optimiser la performance thermique et la consommation énergétique.

• **kWh** : kilo. Watt.heure.
Le watt étant l'unité pour quantifier une puissance, un flux énergétique ou un flux thermique.

Note :

1. Consommation maximale des bâtiments, obligatoire jusqu'au 1^{er} janvier 2018, puis qui passera à 50 kWh/(m².an).

Face au constat sans appel des impacts énergétique, économique et environnemental du bâtiment, le Grenelle 2 de l'environnement instaure dès 2012 une réglementation thermique (RT2012) sur la construction d'édifices neufs basse consommation. Qu'il s'agisse de maisons individuelles, de résidences collectives, de structures publiques ou affectées au secteur tertiaire, les nouveaux bâtiments doivent désormais répondre à l'obligation de consommer aux alentours de 57,5 kWh/(m².an)¹, contre en moyenne 300 actuellement. Cette RT2012 incite par ailleurs à une rénovation thermique et énergétique du parc immobilier existant. Objectifs du gouvernement français : réduire la

consommation d'énergie de 150 milliards de kWh[•] et les émissions de CO₂ d'au moins 13 millions de tonnes, d'ici 2020.

Cap sur les bâtiments à énergie positive

Dans ce contexte, et depuis sa création en 2005, l'Institut national de l'énergie solaire² (Ines) oriente ses recherches pour trouver les solutions qui permettront de lutter, toujours plus, contre ces « prédateurs » énergétiques. « Nos projets impliquent une projection en 2020 avec des efforts de R&D portant notamment sur le bâtiment dit à énergie positive » précise Philippe Malbranche, directeur général de



l'Ines. C'est un édifice qui, en plus de consommer moins, produira en moyenne autant, si ce n'est plus, d'énergie qu'il n'en consomme. Une autonomie qui demande, notamment, d'intégrer des systèmes de ventilation et de production de chaleur pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire, émettant moins de CO₂ et fonctionnant autrement qu'à l'électricité ! L'une des alternatives repose sur l'énergie solaire thermique, **active** ou **passive**, c'est-à-dire sur l'utilisation directe de la chaleur émise par les rayonnements du Soleil. Or, ce type de système thermique, basé sur une énergie renouvelable, impose de composer avec l'intermittence de la production liée aux caprices de la météo. Il est donc indispensable de pouvoir stocker l'énergie pour ajuster la production à la consommation. Ainsi, des recherches sont menées à l'Ines sur des dispositifs de stockage. Ils possèdent chaque fois un réservoir, tel que de l'eau ou des **matériaux à changement de phase** dans le cas du projet Séli du CEA-Liten et de la société Idex, et un échangeur pour redistribuer la chaleur emmagasinée à la demande. Et ce, grâce à un pilotage intelligent, par algorithmes, qui permet une optimisation de leur fonctionnement, de la consommation et donc de l'efficacité énergétique du bâtiment. À terme, le bâtiment à énergie positive intégrerait cette gestion énergétique dès sa phase de conception.

Mais attention ! « L'efficacité énergétique n'est pas synonyme de performance à outrance. Il s'agit d'optimiser des solutions où le confort des résidents reste au cœur des recherches. Car l'utilité première d'un bâti est bien de les abriter et de faire en sorte qu'ils s'y sentent bien » rappelle Philippe Malbranche. Et cela passe par une bonne qualité de l'air, un confort visuel, acoustique, et thermique bien sûr. « De ce point de vue là, les bâtiments qui se construisent aujourd'hui sont très bien isolés, au détriment parfois de la qualité de l'air. Isoler davantage pourrait être préjudiciable à la nécessité de ventilation et aurait un impact économique sur la construction. Or, le bâtiment de 2020 doit coûter autant, voire moins, que celui de la RT2012 » indique Ophélie Ouvrier-Bonnaz, chercheuse CEA au LGEB³ de l'Ines.

De la modélisation à la validation en conditions réelles

Pour aboutir à des résultats probants sur chaque projet de futurs bâtiments, pour le résidentiel, le tertiaire ou l'industrie, les équipes du CEA ont su développer les outils numériques permettant de modéliser une proposition. S'en suit la réalisation de simulations sur ses performances dynamiques et sa consommation, en fonction des systèmes de chauffage et de ventilation testés et pilotés. L'étape d'après consiste à mener des essais grandeur nature sur les maisons Incas de la plateforme expérimentale de l'Ines. Équipées de capteurs ces dernières permettent de mesurer l'efficacité sur démonstrateur. Vient enfin l'étude « en conditions réelles » pour valider définitivement, ou pas, la solution. Lancé en 2014 pour 5 ans dans le cadre du programme énergies décarbonées des investissements d'avenir, le projet COMEPOS⁴ est un parfait exemple de

cette dernière étape. Coordonné par le CEA, il regroupe 22 partenaires, dont de nombreux industriels, pour développer un concept de maison individuelle à énergie positive tous usages et démontrer sa faisabilité sur 25 bâtiments démonstrateurs habités et subissant différents climats. « Les études en conditions réelles sont aussi l'occasion de réaliser toute une série de mesures pour considérer l'impact du comportement de l'habitant sur la consommation énergétique » informe Arnaud Jay, chef de laboratoire à l'Ines. Pour travailler sur ce paramètre important, l'Ines avait aussi pris part au projet Gospels de 2011 à 2013, financé par l'ADEME Rhône-Alpes, pour développer une méthodologie inédite de suivi des performances énergétiques d'un parc de six logements sociaux. Philippe Maréchal, également scientifique au LGEB, explique que « des capteurs avaient été installés sur les systèmes de chauffage sanitaires, les appareils électriques domestiques... afin de décomposer la consommation des usagers. Nous avons également mesuré le taux de CO₂, la température et l'hygrométrie. » Dans le même registre, le projet ANR COMIS permettra de développer une méthodologie de mesure de l'efficacité énergétique du bâtiment Helios dans lequel les chercheurs de l'Ines sont abrités. Tandis que le projet ANR INVOLVED étudiera les moyens d'action sur les usagers de ce même bâtiment pour les rendre acteurs de la réduction énergétique. Objectif final : déployer et industrialiser un outil logiciel permettant de sensibiliser le consommateur en temps réel sur son comportement et la répercussion sur sa facture... Celui-ci, comme l'ensemble des travaux menés pour le bâtiment du futur, sera également très précieux pour la réhabilitation des logements déjà existants. ●



► **Maisons à énergie positive imaginées dans le cadre du projet COMEPOS.**

● **Solaire thermique actif :** technologie basée sur des capteurs solaires thermiques installés sur les toits des bâtiments pour recueillir l'énergie du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur, lequel est alors utilisé pour produire de l'eau chaude sanitaire ou chauffer des locaux.

● **Solaire thermique passif :** technologie reposant, non pas sur des éléments actifs comme les capteurs mais, sur des concepts de génie civil et climatique faisant appel à une architecture et à des matériaux spéciaux afin de chauffer, climatiser ou éclairer des locaux.

● **Matériaux à changement de phase :** matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte.

Notes :

2. Institut fondé par le CEA, le CNRS, l'Université de Savoie et le CSTB.

3. Laboratoire de gestion énergétique du bâtiment.

4. Conception et construction Optimisées de Maisons à Énergie POSitive.

► **Installation d'instruments de mesure dans les maisons Incas.**

Les cellules Passys permettent de tester différentes solutions de rénovation de façade, incluant également les systèmes de chauffage et de ventilation.



RÉNOVATION : L'INNOVATION SUR MESURE

Avec une consommation annuelle d'environ 300 kWh/m².an, contre 57,5 pour les nouveaux édifices, les bâtiments existants, principalement les maisons individuelles, sont un véritable gouffre énergétique et un important émetteur de gaz à effet de serre ! Il est donc impératif de les rénover. Un travail de longue haleine sur lequel l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) a positionné ses efforts de R&D.

Que ce soit au niveau de l'enveloppe, des systèmes thermiques et de leur gestion, tous les résultats obtenus par l'Ines sur les bâtiments de 2020 peuvent s'appliquer à ceux en rénovation, qui constituent finalement le plus important gisement d'économie en énergie. « En France, moins de 1 % du parc immobilier est renouvelé chaque année. Il y a donc un potentiel énorme dans ce domaine mais le marché n'est pas encore lisible »

indique Etienne Wurtz, Directeur de recherche à l'Ines. Et contrairement à la construction de nouveaux bâtiments, la réhabilitation de logements ne suit pas de réglementation particulièrement sévère. Pourtant la rénovation est bel et bien porteuse d'enjeux économiques et environnementaux essentiels. C'est pourquoi, des équipes de l'Ines focalisent leurs efforts de recherche et de développement pour trouver des solutions techniques

innovantes et optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments existants.

Fortes de leurs compétences et des résultats de recherches sur le neuf (voir article p. 16), ces équipes du CEA interviennent sur la rénovation en recherchant une nouvelle approche par rupture. Elles espèrent chaque fois mettre en œuvre des technologies efficaces, qui vieillissent bien et qui soient industrialisables. Ce type d'études se fait au cas par cas avec, avant toute chose, l'établissement d'un état des lieux du bâtiment : quelle épaisseur de murs ? Quels matériaux ? Quel type de fenêtres ? Quels systèmes de chauffage ou de stockage thermique ? Ces données descriptives sont ensuite intégrées dans les outils de modélisation pour simuler et anticiper, parfois sur plusieurs années, l'impact de telle ou telle solution de rénovation, et ce afin de sélectionner la plus pertinente. Cette démarche impose de prendre en compte toutes les contraintes réglementaires liées à l'édifice, comme l'interdiction de toucher à la façade ou encore celle d'empiéter de dix centimètres sur le trottoir. « Ces contraintes empêchent parfois de proposer la combinaison technico-économique optimale pour les travaux » précise Etienne Wurtz.

Isoler par l'extérieur...

Dans leur démarche de rénovation, les chercheurs considèrent donc le bâtiment dans son ensemble. Toutefois, le travail sur son enveloppe, autrement dit murs, fenêtres et toiture, constitue l'angle de recherche numéro 1. « Contrairement aux maisons neuves, le bâtiment ancien est une véritable passoire thermique. Il faut en priorité l'isoler, en prenant en compte la ventilation, pour diminuer les besoins en air chaud, avant de toucher aux systèmes de chauffage et de gestion intelligente des installations » indique Philippe Malbranche, Directeur général de l'Ines. Plusieurs options possibles. Tout d'abord, une isolation par l'extérieur en installant par exemple une façade en bois ou en projetant sur les murs un enduit super-isolant, comme l'enduit à base d'aérogel développé par le CEA, en collaboration avec Mines ParisTech, le groupe Parex et l'entreprise Ennersens. Par ailleurs, cela peut être l'occasion d'exploiter des technologies de revêtement multifonctionnelles développées

par les scientifiques de l'Ines, comme des panneaux photovoltaïques à la fois producteurs d'électricité et isolants, qui sont directement intégrés en façade ou en toiture. Des pistes prometteuses existent aussi pour fonctionnaliser les fenêtres : elles pourraient protéger des rayons du Soleil, récupérer sa chaleur et produire de l'électricité ! De tels produits permettent, entre autres, de réduire les interventions de mains d'œuvre sur les chantiers.

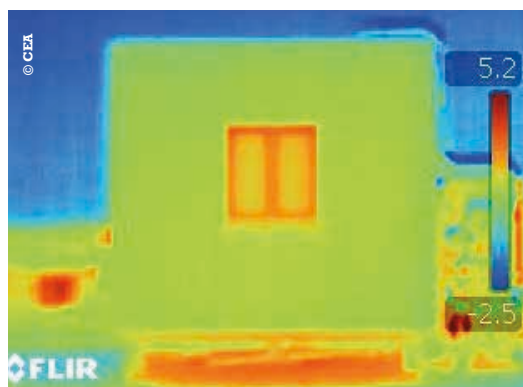
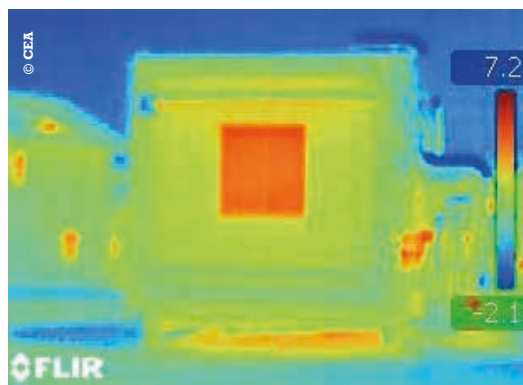
Ou par l'intérieur

Malheureusement, la technique de rénovation par l'extérieur n'est pas toujours envisageable si l'on considère le cas des bâtiments classés. Même si bien souvent l'air s'en échappe de tous bords, il est par exemple impensable, et surtout interdit, de modifier les façades des bâtiments haussmanniens à Paris. Au regard de cette situation, une autre option de rénovation consiste à donner une seconde jeunesse aux parois, par l'intérieur cette fois-ci. Mais sans pour autant diminuer la surface du logement, étant donné le prix au mètre carré de l'immobilier... Il est alors possible d'utiliser des superisolants, tels que les aérogels ou les isolants sous vide, innovations faisant leur apparition dans le bâtiment aux côtés de matériaux plus connus comme la laine de verre, la fibre de bois et le polystyrène. D'autres édifices, comme les bâtiments de bureaux aux façades en verre, ou façades miroirs, ne permettent pas non plus de rénovation par l'extérieur. C'est ce type de bâtiments que cible le projet Rénov'Indus avec une solution qui consiste à isoler par « la boîte dans la boîte ». Derrière ce nom à l'évocation un peu magique se cache un concept reposant sur la reconstruction d'une enveloppe entière, plafond compris, dans celle déjà existante, en incluant chauffage et ventilation. « Bureau après bureau, les travaux permettent de rénover très rapidement, ce qui est un réel avantage notamment lorsqu'il n'est pas possible de vider le bâtiment de ses occupants. Par ailleurs, cette alternative permet de s'attaquer à des "épaves thermiques" où c'est parfois compliqué de modifier le bâti initial, quand celui-ci contient de l'amiante par exemple » explique Virginie Renzi, chef de laboratoire à l'Ines, qui teste cette approche de boîte dans la boîte sur les cellules Passys. Au nombre de quatre sur la ►►



Application, sur une maison Incas, de l'enduit super-isolant à base d'aérogel développé par le CEA et des partenaires industriels.

plateforme d'expérimentation du CEA, ces cellules sont utilisées pour développer et caractériser des composants d'enveloppe et de systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation). Installées sur une plaque tournante, pour orienter librement la façade de test, elles sont par ailleurs instrumentées pour le suivi énergétique et l'évaluation du confort d'ambiance (confort thermique, confort visuel, qualité de l'air, station météorologique, comptage énergétique).



● **Pont thermique :**
point de la construction de l'enveloppe d'un bâtiment où la barrière isolante est rompue.

● **Pompe à chaleur :**
dispositif qui puise de l'énergie naturelle à l'extérieur du logement, dans l'air ou la terre, et la transfère à l'intérieur pour réchauffer ou rafraîchir la température ambiante.

● **Inertie thermique :**
résistance d'un matériau au changement de sa température lorsqu'intervient une perturbation de son équilibre thermique, c'est-à-dire le point où sa température est fixe et les échanges de chaleur avec son environnement équilibrés.

▶ **Test d'une façade en bois sur une cellule Passys et mesure du niveau d'isolation. La couleur orange démontrant une déperdition de chaleur.**

Ainsi, les essais en conditions expérimentales permettent de valider et enrichir les modèles numériques des solutions de rénovation évaluées. Très innovantes, les technologies utilisées dans les différentes solutions testées sur les cellules Passys sont développées soit dans les laboratoires du CEA, soit par des industriels qui font appel à l'Ines pour pallier des contraintes de coût, d'utilisation ou de capacité d'industrialisation de leur produit. Une véritable plus-value du CEA, qui considère chaque fois l'aspect technico-économique. « *Les briques technologiques sur lesquelles nous travaillons peuvent ainsi se retrouver sur le marché dans les cinq années qui suivent* » explique la chercheuse. Actuellement, différentes combinaisons de boîtes, avec matériaux d'isolation, chauffage et ventilation, sont essayées sur les démonstrateurs. « *Pendant toute une année, incluant donc un été et un hiver, nous allons réaliser des mesures pour, entre autres, comparer les performances thermiques de notre boîte aux prédictions numériques. Au printemps 2016, l'une de nos solutions passera d'ailleurs au test réel dans un bureau du CEA Grenoble* » raconte Virginie Renzi. Ainsi, il sera possible de statuer sur la pertinence du projet, sur le respect du confort des occupants et l'atteinte de l'économie énergétique souhaitée. « *La validation définitive de la solution demande une voire plusieurs dizaines d'expérimentations en réel, notamment pour rendre compte des résultats sous différents climats et par différentes typologies d'usagers. Cela, afin de nous assurer que nous proposons une véritable rupture technologique pour, peut-être, faire émerger une nouvelle filière de la réhabilitation globale* » conclut Philippe Malbranche.

Adapter les équipements au niveau d'isolation

À l'issue des travaux d'isolation, l'efficacité obtenue est toutefois très variable, fonction du type de bâtiment, de sa taille, de son environnement : « *il est par exemple difficile d'isoler correctement les barres d'immeubles des années soixante possédant des balcons. Leur jonction avec la dalle constitue des ponts thermiques* » qui entraînent une véritable déperdition énergétique » explique le scientifique. Du niveau d'isolation finalement atteint, dépendront les besoins en chauffage et climatisation. En effet, pour une maison bien isolée, il sera par exemple possible de conserver un petit chauffage électrique d'appoint. En revanche, si elle consomme encore beaucoup, un équipement plus efficace, comme une **pompe à chaleur** ou des systèmes solaires combinés, sera judicieux. Le choix optimum dépendra également de l'**inertie thermique** du logement : lorsque celle-ci est faible, une maison réagit quasi instantanément à une perturbation thermique, comme l'ouverture d'une fenêtre, et voit sa température chuter rapidement. Il faudra alors être en mesure de la remonter aussi vite. En revanche, si l'inertie thermique est forte, la chaleur stockée dans les murs de la maison lui permet de résister à cette perturbation. Et chauffage éteint, elle ne perdra qu'1 °C par jour. Mais en contrepartie, elle sera très difficile à réchauffer. Donc à chaque situation, son système de chauffage adapté ! Il faut aussi répondre aux interrogations sur les dispositifs de stockage : où le placer ? Quelle technologie utiliser ? Comment la choisir et avec quel dimensionnement ? Quelle sera sa durée de vie et donc le temps de retour sur investissement ? La touche finale de la rénovation : optimiser et piloter l'utilisation de tous ces systèmes de chauffage, de ventilation et de stockage en anticipant la température de la pièce et les besoins énergétiques en fonction de la météo. Une gestion que l'Ines sait déjà intégrer à ses modèles grâce à ces travaux sur les bâtiments du futur (voir article p.16) ! ●



© Viessmann

◀ **Capteurs solaires à tubes sous vide, développés par le CEA-Liten et la société Viessmann.**

DES RÉSEAUX POUR CHAUFFER LES VILLES

Mutualiser la production d'énergie thermique et la distribuer à l'échelle d'un quartier, voire d'une ville : voici l'objectif des réseaux de chaleurs. Des dispositifs sur lesquels le CEA travaille pour permettre de répondre, en partie, à l'engagement de la France de porter à 23 % la part des énergies renouvelables dans sa production annuelle de chaleur d'ici 2020.

« **N**ous sommes un des rares pays qui utilise l'électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Or, c'est une aberration thermodynamique » explique Philippe Papillon chef du laboratoire LSHT¹ de l'Institut national de l'énergie solaire (Ines). En effet, les rendements sont très mauvais : 2,5 kWh d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'énergie finale. Le chauffage thermique direct par réseau de chaleur serait, de fait, bien plus adapté. Le principe : un système central produit de la chaleur qui est ensuite véhiculée par un liquide caloporteur et distribuée, grâce à des échangeurs, aux différents usagers, à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Bien qu'ils ne couvrent actuellement que 6 à 7 % des besoins thermiques en France, de tels réseaux apparaissent comme un moyen d'utiliser massivement des énergies décarbonées (biomasse, géothermie, solaire, nucléaire...), ou des énergies de récupération.

À l'Ines, des équipes travaillent sur l'optimisation des réseaux de chaleur déjà en place pour améliorer leurs performances, intégrer des dispositifs de stockage thermique et instaurer un pilotage intelligent du système. Philippe Papillon ajoute : « nous œuvrons également à l'introduction du solaire thermique pour notamment réduire les coûts de la chaleur produite. Contrairement à une installation individuelle, il faut ici plusieurs centaines, voire milliers, de mètres carrés de capteurs solaires adaptés à de grandes surfaces. Nous avons ainsi développé des capteurs à tubes sous vide avec l'entreprise Viessmann et des capteurs plans avec la société Clipsol ». La première technologie est exploitée

dans l'écoquartier de Balma-Gramont, aux abords de Toulouse, et la seconde sera mise en route à Juvignac, près de Montpellier. Cependant, la France a encore du chemin à faire dans ce domaine pour rattraper ses voisins européens, comme le Danemark.

Usines, centrales : de la chaleur à exploiter

En plus de pouvoir fonctionner à partir des énergies renouvelables, les réseaux de chaleur permettent de valoriser la **chaleur fatale**^{*}. Ainsi, dans certaines villes où le pic de consommation électrique a lieu en été pour la climatisation, le CEA explore la récupération de la chaleur des usines d'incinération de déchets pour la transformer en froid au niveau des bâtiments. Autre piste : exploiter la chaleur des réacteurs nucléaires. Pendant longtemps, l'éloignement géographique entre la centrale nucléaire et les usagers a été un frein au développement de cette application. « *Désormais, la technologie moderne des canalisations permet le transport de chaleur sur des distances supérieures à 100 km, avec des pertes thermiques inférieures à 2 %* » raconte Henri Safa de l'I2EN² et du CEA-DEN. À court terme, un projet proposé par la Direction de l'énergie nucléaire du CEA consistera à monter un banc test de nouvelles structures sur quelques dizaines de mètres, à Cadarache, pour démontrer leurs performances. Ces travaux ouvrent la voie de la **cogénération**^{*} nucléaire à grande échelle, dont les enjeux sont mis en exergue aux niveaux national par l'alliance Ancre³ et international par l'AIEA. ●

● **Chaleur fatale :** chaleur qui est produite par un processus dont l'objet n'est pas la production de cette chaleur. Par exemple : chaleur rejetée lors de l'incinération des déchets.

● **Cogénération :** production simultanée de deux formes d'énergie différentes dans la même centrale. Ici, électricité et chaleur.

Notes :

1. Laboratoire des systèmes solaires haute température.
2. Institut international de l'énergie nucléaire.
3. Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'Énergie. Membres fondateurs : CEA, CNRS, CPU, IFPEN.

LE CEA DANS LES MÉDIAS

AVENIUM DEVIENT QUESTEL CONSULTING ET S'INTERNATIONALISE

LE DAUPHINÉ LIBÉRÉ / 10 MARS 2015

Avenium est une start-up de CEA-Investissement fondée en 2009 pour vendre des droits d'exploitation sur des brevets, une activité autrement appelée « *licensing* ». En fusionnant avec la société Questel, pour devenir Questel consulting, elle peut désormais proposer une offre complète aux clients, outils et conseils, pour qu'ils puissent construire leur stratégie de propriété intellectuelle. Par ailleurs, le journal précise que Questel consulting, dans sa mission, pourra bénéficier des nombreuses implantations de Questel dans le monde.

DES BATTERIES POUR LES BUS ÉLECTRIQUES

IT INDUSTRIES & TECHNOLOGIES / 1^{ER} MARS 2015

Entre batterie et supercondensateur : voici le type de systèmes de stockage ultrarapides développés par Nawatechnologies, start-up essaimée du CEA-Iramis. Permettant une circulation du courant très importante, ces systèmes pourraient parfaitement équiper les bus électriques de ville pour une recharge, très rapide, à chaque arrêt. De fait, précise le mensuel, ils ont une capacité de 10 Wh et leur taille va du tube d'aspirine à la canette de soda. L'innovation réside dans des nanotubes de carbone qui forment les deux électrodes du dispositif.



▲ Wafer développé par la société Nawatechnologies.

EVADERIS DÉVELOPPE LA PUCE LONGUE DURÉE

L'USINE DIGITALE / 7 MARS 2015

Créer un processeur de contrôle qui donne de la puissance de traitement d'informations à des systèmes ayant peu d'énergie pour fonctionner ; et ce, grâce au développement d'une nouvelle architecture intégrant des mémoires « non volatiles » : tel est l'objet de la société EVaderis, essaimée de Spintec, laboratoire mixte CEA-CNRS-UJF-INP, pour favoriser l'émergence d'objets connectés performants et à longue durée de vie. Le site informe que la société vise une mise sur le marché du produit à l'horizon 2017 pour des applications médicales et industrielles.



OUVRIR L'INTERNET DES OBJETS AU SATELLITE

LES ÉCHOS / 2 MARS 2015

Tout en restant bon marché, l'Internet des objets peut-il s'ouvrir aux communications satellitaires ? C'est le pari d'Airbus Defence & Space qui étudie un système bimode, satellite et terrestre, avec la start-up toulousaine Sigfox. Les deux entreprises ont pour cela lancé le projet de R&D Mustang, en se rapprochant notamment du CEA-Leti qui sera chargé de miniaturiser le dispositif de modulation de fréquence dans une puce. Comme le précise le quotidien, un démonstrateur de l'ensemble du système sera réalisé pour les avions, pour servir de *tracking* et de voie de secours.

IL DIVISE PAR QUATRE LE PRIX DES LED

ENJEUX LES ÉCHOS / 1^{ER} MARS 2015

Dans sa rubrique *Débriefing*, le mensuel propose un portrait de Giorgio Anania, vétéran de la Silicon Valley et fondateur d'Aledia en 2011, spin-off du CEA-Leti. L'occasion de découvrir cette entreprise qui commercialise une nouvelle génération de LED à base de couche de nitrure de gallium qui poussent sous forme de nanofils 3D sur des plaques de silicium, et non plus sur du saphir. Cette technologie de rupture permet un meilleur rendement lumineux et, surtout, des procédés de production beaucoup plus rapides et moins coûteux.

KIOSQUE



Suivez le guide pour entreprendre !

L'engouement pour l'innovation et l'entrepreneuriat est de plus en plus fort en France. Pour preuve, l'augmentation du nombre de start-up et des plateformes de *crowdfunding*, ou encore la création du statut « Jeune entreprise innovante (JEI) ». En s'appuyant sur l'expérience concrète de jeunes sociétés dans les secteurs des technologies de l'information et des biotechnologies, ce guide apporte des informations précieuses aux entrepreneurs sur des aspects pratiques, juridiques, sociaux, fiscaux...

Guide de la jeune entreprise innovante. Lison Chouraki. Éditions Dunod. 35 €

Introduction au climat

Comment fonctionne la machine climatique ? Comment faire la part des facteurs naturels et des activités humaines dans le récent réchauffement ? Des questions auxquelles répond la climatologie grâce à des méthodes d'observation, d'analyse, de modélisation et de reconstitution des climats passés. À l'aube de la conférence « Paris Climat 2015 », cet ouvrage écrit par des chercheurs du LSCE fait le point sur l'état de l'art. Avec une préface du climatologue du CEA et membre du GIEC, Jean Jouzel.

Le climat : la Terre et les Hommes. Jean Poitou, Pascale Braconnot et Valérie Masson-Delmotte. Éditions EDP Sciences. 24 €



Le marché du réchauffement ?

Le bon sens et le calcul économique suggèrent d'agir contre le réchauffement climatique dès aujourd'hui. Deux économistes le démontrent, en confrontant leurs points de vue sur les conditions de succès de la négociation internationale et sur la politique économique climatique. Ils soulignent notamment que cette politique permettrait de corriger l'insuffisante capacité du marché à produire des innovations majeures, en stimulant une nouvelle révolution industrielle, une croissance sobre en carbone.

2 économistes face aux enjeux climatiques. Roger Guesnerie et Nicholas Stern. Éditions Le Pommier. 12 €

Développement durable et entreprises

Les rapports entretenus par les entreprises avec l'environnement sont multiformes, puisant leurs racines dans la révolution industrielle. Ils ont fait l'objet d'une attention accrue à partir des années soixante et, plus récemment encore, avec les problématiques du réchauffement climatique et les nuisances, dommages et risques dont les entreprises sont potentiellement porteuses. Cet ouvrage a pour vocation de s'interroger sur les dynamiques existant entre firmes, environnement et territoires.

Entreprises et environnement : quels enjeux pour le développement durable ?

François Bost et Sylvie Daviet. Éditions Presses universitaires de Paris Ouest. 26,50 €



SUR LE WEB

L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE

Chercheur au CEA et directeur de NeuroSpin, Denis Le Bihan explique le fonctionnement de l'IRM. Non invasive et inoffensive, cette technique d'imagerie permet de détecter sclérose en plaque, tumeurs, vieillissement cérébral, maladies neurodégénératives...

<http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos>



PROJET ARISE

Arise, pour *Atmospheric dynamics Research Infrastructure Structure in Europe*, a pour objectif d'établir une plateforme de recherche et de données atmosphériques unique en Europe, combinant les observations des études théoriques et de modélisation, pour élucider la dynamique de l'atmosphère.

<http://arise-project.eu/>

PROGRAMME SMART

Lancé dès 2006 par EDF et le CEA, SMART est un programme de recherche visant à mieux évaluer la résistance des bâtiments nucléaires aux séismes. Il comporte notamment de grandes campagnes expérimentales réalisées au CEA sur la table vibrante AZALÉE de l'installation TAMARIS.

<http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos>



De la **R**echerche
à l'**Industrie**
avec le CEA

MARDI 31 MARS 2015

MAISON DES CENTRALIENS

SEMAINE
DE
L'INDUSTRIE
sans accident - sécurité pour tous

« CHANGEMENTS CLIMATIQUES : NOUVEAUX ENJEUX INDUSTRIELS »

Paris. Maison des Centraliens. Le mercredi 31 mars 2015.

Chercheurs et industriels sont conviés par le CEA à échanger sur les enjeux industriels inhérents aux changements climatiques, dans le cadre de la Semaine de l'industrie. Plusieurs thématiques seront abordées dans une dizaine de conférences lors d'une journée introduite par le climatologue du CEA et membre du GIEC, Jean Jouzel. Il sera notamment question de comprendre plus finement les impacts économiques du réchauffement climatique et d'identifier de nouvelles ruptures technologiques dans les domaines de l'énergie, de la santé publique ou de l'agriculture...