

ÉNERGIES DU XXI^E SIÈCLE

- ➔ Vision intégrée de l'énergie
- ➔ Production d'énergie bas-carbone
- ➔ Gestion du système énergétique
- ➔ Économie circulaire des énergies bas-carbone





Sommaire



Introduction 03



Vision intégrée de l'énergie 04-07



Production d'énergie bas-carbone 08-27

L'énergie nucléaire de fission	9
Les réacteurs	10
Le cycle du combustible	15
Le démantèlement	17
La fusion thermonucléaire	18
La production solaire	20
Solaire photovoltaïque	21
Solaire thermique	23
De la biomasse aux biocarburants	25



Gestion du système énergétique 28-39

Pilotage des réseaux	29
Stockage	30
Vecteur Hydrogène	33
Mobilité décarbonée	39



L'économie circulaire des énergies bas-carbone 40-43

Réduire	41
Prolonger	42
Recycler	42

Introduction



Internet, téléphone, chauffage, transport... l'énergie est partout autour de nous. Des usages collectifs aux besoins individuels, nous consommons de l'énergie sans même nous en rendre compte.

Et pourtant l'enjeu est de taille : une panne et tout déraile !

Stratégique, le secteur de l'énergie est aussi l'un des plus grands émetteurs de CO₂ et participe donc au dérèglement climatique.

Alors comment concilier ce besoin en constante hausse et les enjeux environnementaux ?

Il faut décarboner l'énergie, c'est-à-dire remplacer les énergies fossiles par des énergies bas-carbone (nucléaire, hydraulique, solaire, éolien...) et réduire la consommation totale en améliorant l'efficacité des technologies.

En France, l'objectif fixé par la stratégie nationale bas-carbone est de réduire les émissions de CO₂ pour atteindre la neutralité carbone¹ en 2050. Et cela concerne tous les domaines : l'habitat, les transports, l'industrie ou encore l'agriculture. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) publiée en 2020 donne des objectifs chiffrés. Par exemple, elle fixe pour 2028 une réduction de 16,5 % de la consommation d'énergie finale et une diminution de 35 % de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2012. En 2028, 33 % de l'énergie consommée devra être d'origine renouvelable. Enfin, elle vise 50 % d'électricité d'origine nucléaire en 2035 contre 71 % en 2019.

Pour atteindre ces objectifs, il faut développer des solutions complémentaires qui utilisent différents vecteurs énergétiques à différentes échelles spatiales (locales ou centralisées) et à différentes échelles de temps. Par exemple, adapter le stockage à des besoins de courtes durées pour pallier l'intermittence, et à des besoins inter-saisonniers.

Le CEA travaille à ces solutions, notamment au travers d'une vision intégrée de l'énergie. Découvrez à travers ce livret un panorama des sujets explorés par l'organisme : production nucléaire et solaire, stockage et pilotage, vecteur hydrogène, mobilité décarbonée et économie circulaire.

¹ Neutralité carbone : les émissions de gaz à effet de serre sont inférieures ou égales aux quantités de gaz à effet de serre absorbées par les milieux naturels gérés par l'homme (forêts, prairies, sols agricoles...) et certains procédés industriels (capture et stockage ou réutilisation du carbone).



Ligne d'assemblage de batteries Lithium-ions.

Photo de couverture/dos de couverture : Zenobillis ©iStock.com
Petit visuel : Travail sur une chaîne blindée d'un laboratoire "chaud"

dédié à la caractérisation des matériaux et combustibles irradiés. © PF. Grosjean/CEA

Rédaction : Marion Bard - Florence Klotz - Sophie Martin - Flore Sonier - Valerie Vandenberghe - Alexandra Maraval

Réalisation : Agence Gimmik - Avril 2021



VISION INTÉGRÉE DE L'ÉNERGIE

Face aux enjeux énergétiques, il faut repenser le système dans son ensemble, de la production aux nouveaux usages en intégrant des technologies innovantes.

Face aux enjeux énergétiques, il n'y a pas de solution unique, d'énergie totalement propre ou inépuisable. Il faut donc raisonner avec plusieurs types de production, c'est ce que l'on appelle le **mix énergétique** : faire appel à des moyens produisant de grandes quantités d'énergie comme le nucléaire, et à ceux plus locaux ou intermittents comme l'éolien, le solaire ou l'hydraulique. L'enjeu est ensuite de les faire fonctionner intelligemment ensemble.

Au-delà de la production, il faut repenser le système énergétique dans son ensemble pour prendre en compte les nouveaux usages et les nouvelles technologies à disposition. Connecter les différents réseaux (chaleur, gaz, électricité) grâce à des systèmes de conversion d'énergies, stocker le surplus d'énergies pour en disposer plus tard, utiliser des sources insoupçonnées comme la chaleur résiduelle des usines (appelée chaleur fatale) ou encore les batteries des voitures à l'arrêt et piloter l'ensemble pour ajuster au mieux l'offre et la demande.

On parle alors de vision intégrée de l'énergie, et compte tenu de l'interaction croissante des systèmes énergétiques européens, cette vision dépasse les frontières françaises. Elle englobe les échanges d'énergie avec ses principaux voisins : Allemagne,

Belgique, Luxembourg, Italie, Espagne, Royaume-Uni, Irlande, Pays-Bas et Portugal.

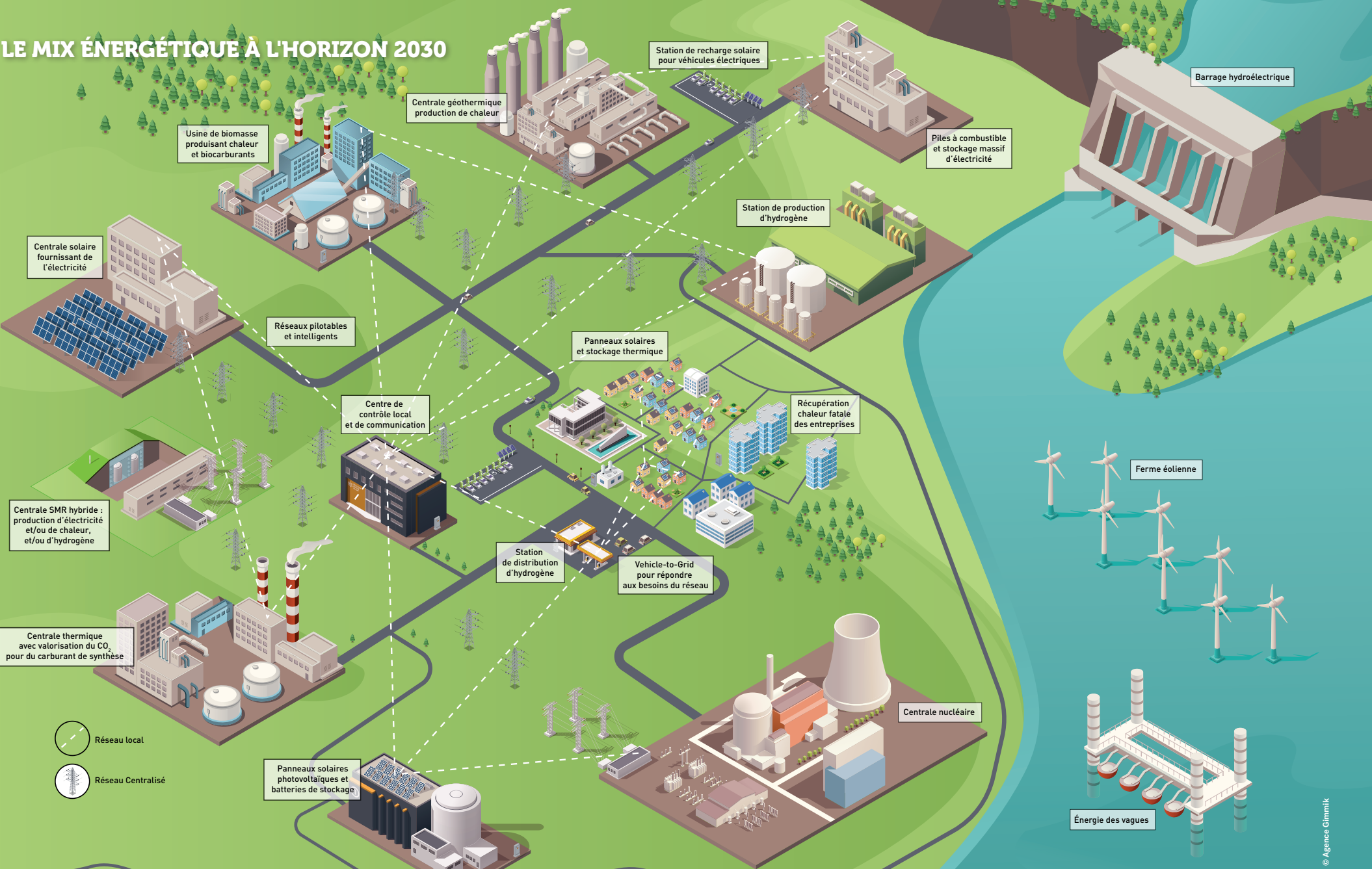
En plus du défi technologique, cette vision intégrée doit proposer des solutions économiquement viables et durables, qui prennent en compte l'approvisionnement et le recyclage des matériaux (métaux rares ou critiques, combustibles nucléaires). Enfin, elle devra prendre en compte les dimensions sociales pour accompagner des changements de comportements... et encourager la sobriété énergétique.

Pour un mix décarboné.



© Jérôme Perrodeau/ Les défis du CEA n°241

LE MIX ÉNERGÉTIQUE À L'HORIZON 2030

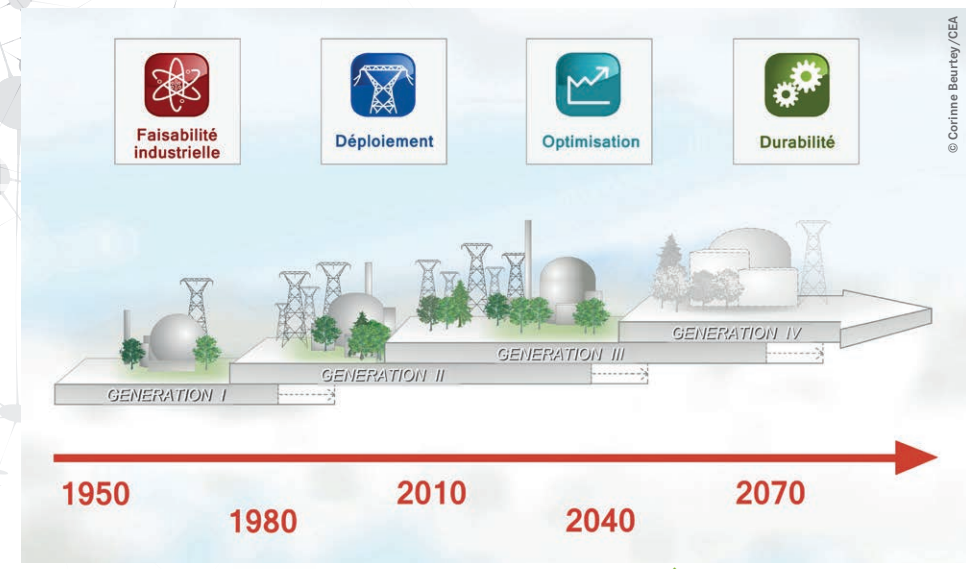


Visualisation 3D d'une simulation de fonctionnement de réacteur nucléaire. © P. Stoppa / CEA



PRODUCTION D'ÉNERGIE BAS-CARBONE

Le mix énergétique fait appel à des moyens produisant de grandes quantités d'énergie, comme le nucléaire, et à d'autres sources, locales et/ou intermittentes.



Les générations successives de réacteurs nucléaires en France.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FISSION

L'énergie nucléaire est utilisée depuis les années 1950 pour produire de l'électricité bas-carbone. En effet, c'est une des énergies qui émet le moins de gaz à effet de serre, avec seulement 12 g/kWh contre 820 g/kWh pour une centrale à charbon (cf tableau p.10). La fumée qui s'échappe des centrales est trompeuse, ce n'est que de la vapeur d'eau !

Depuis sa création, le CEA travaille sur les différents types de réacteurs et le cycle du combustible associé, pour mieux comprendre les phénomènes en jeu, innover et soutenir les industriels du secteur.

ÉMISSIONS DE CO₂ DES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Pour déterminer les émissions de gaz à effet de serre des moyens de production d'énergie électrique, il faut calculer le potentiel de réchauffement climatique de chaque source en étudiant son cycle de vie, de l'extraction minière des matériaux et du carburant en passant par la construction et l'exploitation des centrales de production jusqu'à la gestion des déchets. Ce tableau a été établi en 2014, à partir de centaines d'articles scientifiques, par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques).

ÉMISSIONS EN GRAMMES DE CO ₂ PAR KILOWATTHEURE (GCO ₂ EQ/kWh)	
Technologie	Médiane
Technologies actuellement disponibles	
Charbon	820
Biomasse combinée au charbon	740
Gaz – cycle combiné	490
Biomasse seule	230
Panneaux solaires à grande échelle	48
Panneaux solaires sur toits	41
Géothermie	38
Énergie solaire concentrée	27
Hydroélectricité	24
Éolien en mer	12
Nucléaire	12
Éolien terrestre	11
Technologies en développement	
Charbon avec séquestration du CO ₂	220
Charbon avec séquestration du CO ₂ et gazéification	200
Gaz en cycle combiné avec séquestration du CO ₂	170
Charbon avec séquestration du CO ₂ et combustion à l'oxygène	160
Énergie marémotrice	17

Les réacteurs

La première génération de réacteurs

À la fin des années 1930, la découverte de la réaction de fission marque le début des recherches sur l'énergie nucléaire, aux États-Unis, en Russie, en France et en Grande-Bretagne.

La France a lancé un programme de développement de l'énergie nucléaire dès 1945, avec la création du Commissariat à l'Énergie Atomique par le Général de Gaulle. Son objectif était de pouvoir répondre à la demande croissante d'électricité, en toute indépendance et à faible coût.

Les centrales nucléaires de première génération, utilisant une technologie à l'uranium naturel et au graphite et refroidies au gaz (UNGG), ont été mises en service dès 1956 et la dernière a été arrêtée en 1994. Leur puissance allait jusqu'à 540 Mégawatts électriques (MWe)².

Réacteurs de 2° et 3° générations

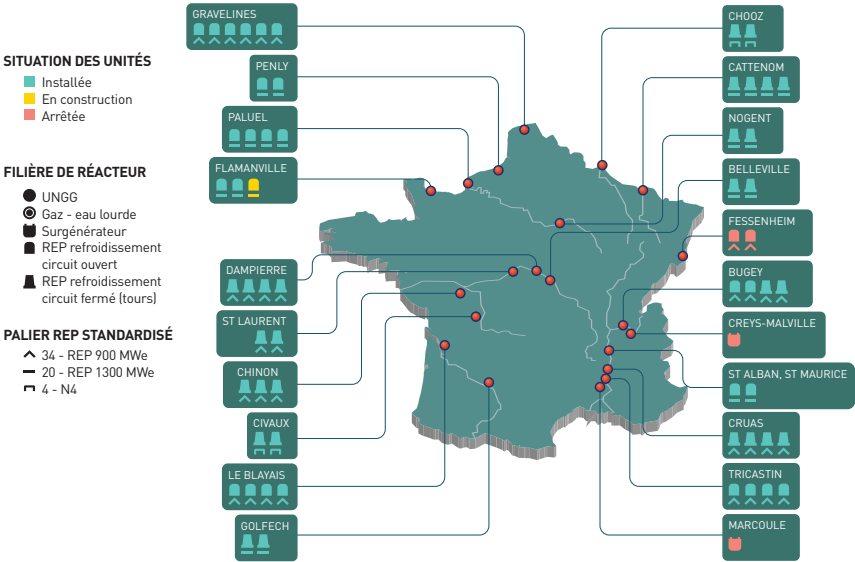
Après le choc pétrolier de 1973, le gouvernement lance la construction d'une seconde génération de réacteurs à eau sous pression (REP), technologie américaine adaptée par EDF. Au total, 58 réacteurs de ce type sont mis en service entre 1977 et 1999 : 34 réacteurs de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et 4 de 1 450 MWe, portant la puissance installée à 62,4 GWe. En 2019, en France, ces réacteurs nucléaires fournissaient 71 % de l'électricité. Demain, l'objectif fixé par la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) est d'atteindre 50 %, en complément des énergies renouvelables.



Tressage d'un tube composite répondant aux besoins du nucléaire actuel et de 4° génération.

2- Mégawatts électriques (MWe) : puissance électrique d'un réacteur en sortie de centrale et réellement fournie au réseau électrique. Elle est à différencier de la puissance thermique, exprimée en MWth, qui correspond à la chaleur produite par le réacteur. La puissance thermique est environ 3 fois supérieure à la puissance électrique.

CARTE DES UNITÉS ÉLECTRONUCLÉAIRES EN FRANCE AU 01/01/2021



LES AVIEZ-VOUS?

Chaque mois, un réacteur de 900 MWe produit en moyenne la consommation de 500 000 foyers.

3- Corium : mélange de matériaux fondus résultant de la fusion accidentelle du cœur d'un réacteur nucléaire.

Au cours de ces années, les progrès technologiques ont permis des améliorations, comme une production électrique plus importante et une sûreté accrue, tout en baissant le coût de l'électricité produite.

Les réacteurs nucléaires de 3^e génération sont dans la continuité de la génération précédente. En France, il s'agit par exemple des EPR (*European Pressurized Reactor*).

Leur conception vise à :

- améliorer la sûreté : avec par exemple l'ajout d'un récupérateur de corium³ sous le cœur du réacteur ;
- augmenter la puissance : 1 600 MWe contre 1 450 MWe maximum pour la 2^e génération ;

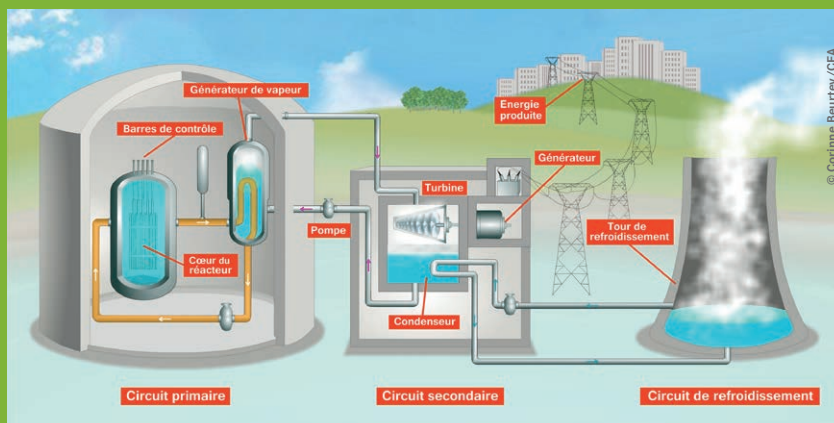
ZOOM SUR

LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

Pour produire de l'électricité, une turbine transmet de l'énergie mécanique à un alternateur qui la transforme en énergie électrique. La turbine peut être entraînée de différentes manières : dans une centrale hydroélectrique,

c'est l'eau, chutant du barrage, qui la met en mouvement ; dans une centrale thermique comme dans une centrale nucléaire, c'est la vapeur sous pression qui la fait tourner. Cette vapeur est générée par une source de chaleur, mais tandis qu'une centrale thermique brûle du charbon, du pétrole ou du gaz, un réacteur nucléaire produit de la chaleur par des réactions de fission de noyaux

atomiques tels que l'uranium. La chaleur ainsi produite est ensuite transportée par un fluide caloporteur. Dans les centrales nucléaires actuelles, ce fluide est tout simplement de l'eau. Dans les systèmes nucléaires du futur, le rôle de caloporteur pourra être assuré par un métal liquide, comme le sodium ou le plomb, ou par un gaz, l'hélium.



- amplifier le cycle du combustible : le combustible MOX (mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium) issu du retraitement des combustibles usés sera plus utilisé, permettant d'économiser environ 17 % d'uranium par rapport à la 2^e génération ;
- diminuer la production des déchets : réduction de 15 à 30 %.

En 2018 et 2019, deux EPR sont entrés en fonctionnement en Chine. En 2020, quatre sont en construction : un en Finlande, un en France et deux au Royaume-Uni.

Réacteurs de 4^e génération

Visant un déploiement après 2050, une 4^e génération de réacteurs, en rupture technologique avec les précédentes, est actuellement en phase d'études et de développement. Menées dans le cadre du Forum international Génération IV, ces recherches visent à répondre au besoin de produire en grande quantité l'énergie électrique nécessaire à notre mode de vie tout en réduisant la quantité de déchets produits, en économisant les ressources et en garantissant une sûreté et une fiabilité maximales.

LES AVIEZ-VOUS?

Les pays membres du forum GenIV : l'Afrique du Sud, l'Argentine, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, les États-Unis, la France, le Japon, la Corée du Sud, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse ainsi que la Communauté européenne Euratom.

ZOOM SUR

LE RJH, UN RÉACTEUR POUR TESTER LES MATÉRIAUX

Dans un réacteur, les matériaux sont soumis à des conditions extrêmes : hautes températures, fortes pressions, irradiation.

Il est donc indispensable de connaître et d'anticiper leur comportement dans ces conditions et sur le long terme. Dans ce but, le CEA dispose de nombreux moyens expérimentaux et pilote en particulier la réalisation du réacteur Jules Horowitz (RJH). En construction sur le site de Cadarache, le RJH est un réacteur



Le RJH en construction mi 2017.

de recherche qui permettra de tester le comportement de matériaux et combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et

futurs. Il assurera également la production de radioéléments pour la médecine nucléaire et l'industrie non-nucléaire.



Circuit d'étude des réactions sodium/eau sur la plateforme Papirus.

Fin 2002, six concepts ont été sélectionnés. Trois sont des réacteurs à neutrons rapides (RNR) : RNR sodium, RNR gaz et RNR plomb. Les autres sont les réacteurs à eau supercritique, à très haute température et à sels fondus.

En France, le CEA travaille sur la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Il assure aussi une veille sur d'autres technologies comme les réacteurs à sels fondus, potentiellement bien adaptés au recyclage des matières nucléaires et à la réduction des déchets générés.

Les SMR, des réacteurs modulaires et compacts

En complémentarité avec les centrales nucléaires de forte puissance, une nouvelle gamme de réacteurs fait son apparition : les SMR (*Small Modular Reactor*). Plus petits, ces réacteurs de faible puissance (entre 50 et 500 MWe) ont la particularité d'être modulaires : les différentes parties sont en effet conçues pour être fabriquées en série et en usine avant d'être assemblées sur site.

Par leur faible puissance, les SMR peuvent s'insérer dans des réseaux électriques à l'échelle locale et sont particulièrement adaptés aux sites isolés.

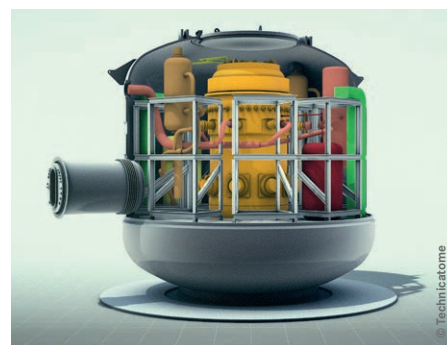


Schéma de réacteur Nuward™.

QU'EST-CE QU'UN RÉACTEUR À NEUTRONS RAPIDES ?

Un réacteur à neutrons rapides (RNR) est un réacteur dont le flux de neutrons n'est pas ralenti (vitesse approximative 20 000 km/s), contrairement aux réacteurs actuels (2 km/s).

Les RNR présentent un intérêt majeur dans la gestion des matières nucléaires : combinés au traitement des combustibles usés et au recyclage des matières nucléaires, ils permettraient d'utiliser en quasi-intégralité l'uranium naturel, jusqu'à devenir indépendant de son extraction.

Ils pourraient aussi à plus long terme produire de la chaleur, de l'hydrogène en les couplant avec des électrolyseurs haute température (voir p.34) ou encore de l'eau douce par dessalement de l'eau de mer.

En France, le projet Nuward™ lancé en septembre 2019 regroupe plusieurs partenaires : EDF, TechnicAtome, Naval Group et le CEA. Dédié à l'export, ce concept vise en particulier le remplacement des centrales à charbon fortement émettrices de CO₂. D'une puissance de 340 MWe, Nuward™ se compose de deux réacteurs de technologie REP à l'architecture compacte et standardisée. La commercialisation est visée pour la prochaine décennie.

Le cycle du combustible

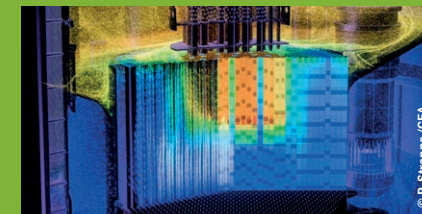
Qu'est-ce que c'est ?

Le combustible utilisé dans les réacteurs actuels est composé majoritairement d'oxyde d'uranium. Un kilo d'uranium produit 10 000 fois plus d'énergie qu'un kilo de charbon ou de pétrole.

ZOOM SUR

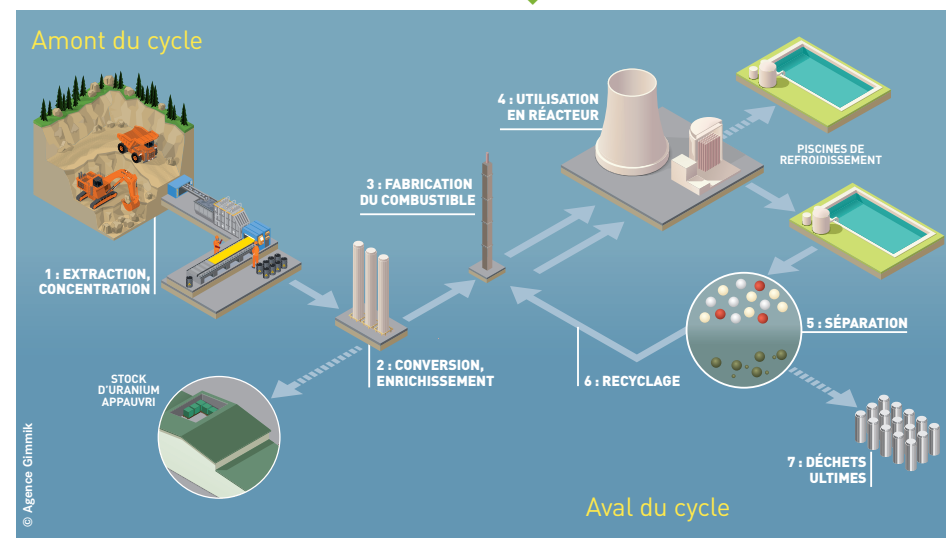
LA SIMULATION

La simulation numérique est une composante incontournable pour la conception des installations nucléaires. Elle permet de prédire leur fonctionnement en régime normal, mais aussi en situation accidentelle. Grâce à la puissance des supercalculateurs, les codes décrivent avec toujours plus de précision les phénomènes physiques au cœur des réacteurs.



Modélisation 3D en soutien à la conception d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

Les étapes du cycle du combustible nucléaire.



ZOOM SUR

ATALANTE, UNE INSTALLATION UNIQUE AU MONDE POUR LES RECHERCHES SUR LE COMBUSTIBLE

Sur le site de Marcoule, Atalante est unique en son genre : avec ses 25 000 m² de locaux et ses 17 laboratoires, elle regroupe l'ensemble des recherches sur les procédés du cycle du combustible nucléaire, en particulier pour son retraitement et recyclage. Les recherches menées ont pour objectif de développer des nouveaux procédés plus efficaces, compacts, économiques et respectueux de l'environnement. Des études sont aussi effectuées sur les actinides mineurs, déchets nucléaires les plus toxiques issus du traitement du combustible. Elles visent à les séparer le plus efficacement possible des matières valorisables et à limiter le volume et la radiotoxicité des déchets ultimes.



↑ Chaîne blindée où sont menées des expérimentations de séparation poussée.



© S. Le Couster/CEA

↑ Dissolution de pastilles MOX en boîte-à-gants, avant la séparation par extraction liquide des constituants du combustible.

Le cycle du combustible regroupe l'ensemble des opérations industrielles, en amont et en aval de son utilisation en réacteurs :

- extraction, purification et enrichissement de l'uranium ;
- fabrication du combustible ;
- traitement du combustible usé afin d'extraire les matières énergétiques recyclables ;
- fabrication du combustible MOX utilisant le plutonium extrait des combustibles usés ;
- conditionnement et stockage des déchets ultimes.

Le CEA mène des actions de R&D sur l'ensemble des procédés du cycle du combustible nucléaire. Ces études visent à optimiser l'utilisation des matières nucléaires tout en minimisant les quantités de déchets produits et leur impact sur l'environnement.

La stratégie de la France en plusieurs étapes

La France, à l'instar du Royaume-Uni, des Pays-Bas, de la Russie et du Japon a dès le début fait le choix de retraiter le combustible usé pour aller vers un cycle fermé du combustible. À terme, l'objectif est de ne plus avoir recours à l'uranium extrait des mines.

Les réacteurs actuels ne consomment que l'uranium 235 (²³⁵U) et un peu de plutonium. Cela signifie que l'uranium 238 (²³⁸U), qui forme 99,3% de la masse de l'uranium naturel, est pratiquement inutilisé.

Afin d'utiliser ce stock, la France envisage plusieurs étapes sur lesquelles travaille le CEA : d'abord, élargir l'utilisation des combustibles MOX issus du

LES SAVIEZ-VOUS?

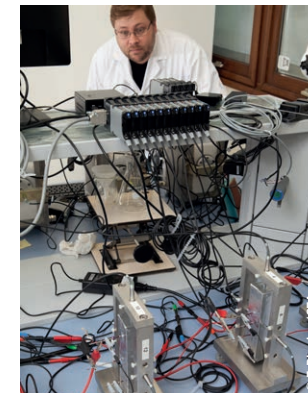
LES DÉCHETS RADIOACTIFS

Comme toute activité industrielle, l'énergie nucléaire produit des déchets. À titre de comparaison, les déchets radioactifs représentent 2 kg des 14 000 kg de déchets industriels produits par habitant et par an en France. Dans ces 2 kg, seuls 20 g sont hautement radioactifs.

Les déchets nucléaires sont répartis en 6 catégories en fonction de leur radioactivité et de leur durée de vie. Ils sont traités, conditionnés, entreposés ou stockés définitivement selon des critères adaptés à chacune.

Le CEA mène des recherches sur le traitement et le conditionnement des déchets ainsi que sur le comportement à long terme des colis et des matériaux du stockage.

En France, c'est l'Andra, l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, qui est chargée de leur gestion à long terme.



↑ Banc de mesures corrosion/déformations d'éprouvettes de matériaux cimentaires.

retraitement du combustible usé à tous les réacteurs du parc actuel. Ensuite, à plus long terme, utiliser l'uranium appauvri⁴ dans des réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération, qui permettent de produire de l'énergie avec tous les isotopes de l'uranium.

Le démantèlement

Arrivées en fin de vie, les centrales nucléaires sont démantelées, c'est-à-dire vidées de leur matières radioactives, démontées et le site assaini. Une fois la déconstruction achevée, le site doit être déclassé par l'autorité nationale de sûreté avant d'envisager de nouveaux usages industriels. Le démantèlement d'une centrale nucléaire peut durer plusieurs décennies, en fonction de la complexité des opérations et du type de réacteur à démanteler. Le CEA gère le démantèlement de ses propres installations nucléaires et développe de la R&D spécifique à ce domaine.

Stocks d'uranium appauvri :
340 000 tonnes en France



© E. Stanišlas/CEA

↑ Assainissement-démantèlement du laboratoire d'analyse des matériaux actifs. État final d'un couloir après écroutage des surfaces et contrôles radiologiques.

4- Uranium appauvri : uranium comportant moins d'isotopes ²³⁵U que l'uranium naturel, résultant des opérations d'enrichissement nécessaires à la fabrication du combustible pour les réacteurs à eau pressurisée.



© P. Dumas / CEA

↑
Pose d'un composant du projet West à l'intérieur du tokamak.

LA FUSION THERMONUCLÉAIRE

La fusion nucléaire est le processus dans lequel deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Cette réaction est à l'œuvre de manière naturelle dans le Soleil et les étoiles. La fusion thermonucléaire dégage une quantité d'énergie colossale en partant de très peu de combustible. Ainsi, avec moins de 2 kg par jour de deutérium et de tritium, on pourrait produire 1 000 MW d'électricité en continu, alors qu'il faudrait plus de 6 000 tonnes de combustibles pétroliers dans une centrale thermique.

La fusion présente plusieurs atouts. Le combustible employé est abondant : les réserves de deutérium, contenu essentiellement dans l'eau de mer, sont infinies à l'échelle de la durée de vie de notre planète. Celles de lithium (nécessaire pour

fabriquer le tritium) sont finies mais disponibles sur plusieurs milliers d'années. Autre atout : ce mode de production d'énergie ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets hautement radioactifs à vie longue. Enfin, la réaction ne peut pas s'emballer et peut être stoppée immédiatement.

Cependant, de nombreux défis technologiques sont à relever avant de pouvoir disposer de cette énergie qui s'envisage donc comme une option à long terme.

Des études en tokamak

Confiner de manière durable cet univers de turbulences que constitue un plasma⁵ chauffé à plus de 100 millions de degrés, apprivoiser cette réaction de manière à en faire un moyen de production d'électricité fiable, rentable et continu supposent de relever un grand nombre de défis. Pour cela, les recherches au sein des tokamaks existants à travers le monde se poursuivent et progressent.

Sur le centre CEA de Cadarache, le premier grand tokamak supraconducteur de l'histoire, Tore Supra, a obtenu son premier plasma en 1988 et ainsi permis d'ouvrir le champ des « décharges longues ». À Culham en Grande-Bretagne, le tokamak européen JET (*Joint European Torus*) est la plus grande installation de fusion au monde. En 1997, JET décroche le record de puissance avec 16 MW.

Aujourd'hui, Tore Supra est devenu West (*W Environment in Steady-state Tokamak*, W étant le symbole du tungstène). Les chercheurs travaillent tant en physique fondamentale et dans le domaine des plasmas que sur les matériaux, la cryogénie ou encore les diagnostics.

Le projet international Iter (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) mobilise l'Union Européenne, la Russie, les États-Unis, le Japon, la Chine, la Corée du Sud et l'Inde. En construction à proximité de Cadarache, ce tokamak devra produire, en injectant une puissance de 50 MW de chauffage du plasma, une puissance thermique de fusion de 500 MW pendant 400 secondes et d'environ 200 millions de watts pendant plusieurs dizaines de minutes. L'enjeu : démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique pour produire de l'électricité à échelle industrielle d'ici la fin du siècle.

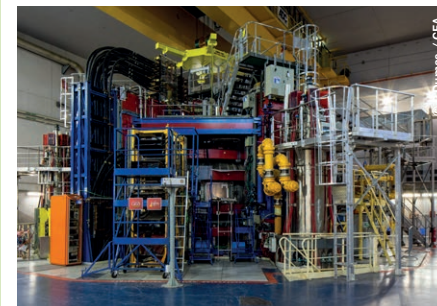
Forts des expériences qui seront menées pour et sur Iter, les chercheurs étudient déjà l'étape suivante, appelée Démo : différents projets de tokamaks pour une filière industrielle de réacteurs de fusion électrogènes.

LE SAVIEZ-VOUS ?

QU'EST-CE QU'UN TOKAMAK ?

Dans un tokamak, trois conditions doivent être remplies pour obtenir des réactions de fusion : une température très élevée (de l'ordre de 150 millions de degrés), une densité de particules suffisante pour produire un grand nombre de collisions, et un temps de confinement de l'énergie suffisamment long.

L'énergie générée par la fusion des noyaux atomiques est absorbée sous forme de chaleur par les parois de la chambre à vide. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de la vapeur, puis, grâce à des turbines et à des alternateurs, de l'électricité.

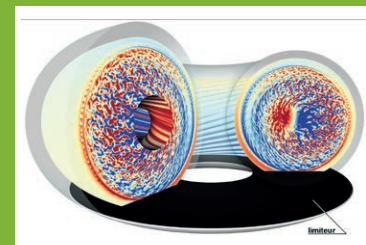


↑
Hall du tokamak.

ZOOM SUR

SIMULATION D'UN PLASMA

La turbulence gouverne le transport de la chaleur dans les plasmas de tokamaks, du cœur chaud vers les parois. L'expérience montre que l'interaction plasma-paroi joue un rôle clé sur les performances globales. Avec le code cinétique 5D Gysela – développé dans le cadre de collaborations nationales et européennes – ces résultats ont été retrouvés qualitativement en modélisant les parois. Un limiteur toroïdal, proche de la configuration du tokamak Tore Supra a ainsi été implémenté dans le code. Un mécanisme de transfert de quantité de mouvement, né au voisinage de ce limiteur, a été identifié. Il joue un rôle central dans la formation d'un écoulement cisailé périphérique bénéfique au confinement.



↑
Simulation 3D d'une turbulence plasma, dans la configuration du tokamak Tore Supra, effectuée avec le code 5D Gysela.

⁵- Le plasma est le 4^e état de la matière. Gaz constitué d'électrons et d'ions (atomes ayant perdu un ou plusieurs électrons), sa température varie d'une dizaine de milliers de degrés à plusieurs centaines de millions de degrés, et sa densité est un million de fois plus faible que celle de l'air.

LA PRODUCTION SOLAIRE

L'énergie solaire est disponible partout sur Terre et représente, théoriquement, 900 fois la demande mondiale en énergie. Mais suivant la météorologie, les saisons et la situation géographique, l'apport journalier en énergie varie de 2-3 kWh en Europe du Nord jusqu'à 4-6 kWh sous les tropiques.

Deux modes d'utilisation de l'énergie solaire sont possibles :

- transformer le rayonnement en chaleur, qui sera utilisée directement (solaire thermique) ou convertie en électricité avec une machine de conversion thermodynamique (solaire thermodynamique à concentration CSP, *Concentrated Solar Powerplant*) ;
- utiliser l'effet photoélectrique qui produit de l'électricité à partir de la lumière. On parle alors de solaire photovoltaïque.

Dès les années 1970, le CEA s'est impliqué dans le solaire thermique, en mettant en œuvre dans le Pacifique les premières maisons, hôpitaux et hôtels solaires au monde. Depuis les années 1980, il mène des recherches sur le solaire photovoltaïque. Ces thématiques sont principalement étudiées aujourd'hui à l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) et à la Cité des énergies.

ZOOM SUR

L'INES

L'Institut national de l'énergie solaire a été créé en 2006. Ce projet ambitieux porté par le Conseil général de la Savoie, la Région Auvergne-Rhône-Alpes et le CEA, rassemble des chercheurs du CEA, du CNRS, du Centre scientifique et technique du bâtiment et de l'Université de Savoie. Son objectif : promouvoir et développer les énergies solaires en France et devenir un leader européen et une référence mondiale dans ce domaine.

À proximité de Chambéry, sur un site de 22 000 m², l'Ines regroupe environ 350 chercheurs, ingénieurs, formateurs et industriels, répartis sur trois plateformes :

- une plateforme « recherche, développement, innovation industrielle » (RDI) qui constitue le cœur des compétences au niveau international ;



↑ Plateforme de test de systèmes solaires photovoltaïques à concentration.

- une plateforme « démonstration » qui permet de caractériser les matériels et systèmes issus de la plateforme RDI ;
- une plateforme « éducation » chargée de quatre missions : l'information, la formation, l'évaluation et la promotion.

Solaire photovoltaïque

La technologie solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie du Soleil en électricité. Malgré son intermittence, il s'agit d'une des sources d'énergies renouvelables présentant le plus fort potentiel de déploiement et d'extension de parts de marché mondial. L'amélioration continue des performances des composants et des systèmes assure un coût de production de l'électricité compétitif. Elle occupe de ce fait une part croissante dans la fourniture d'électricité bas-carbone aux réseaux.

La capacité photovoltaïque installée dans le monde était de 500 GW en 2018 et le niveau du TW devrait être atteint en 2022 ou 2023. Si l'Asie est aujourd'hui le premier marché du photovoltaïque, l'Europe fait un retour sur la scène internationale avec une part de marché d'un peu plus de 10 %, équivalente à celle des États-Unis.

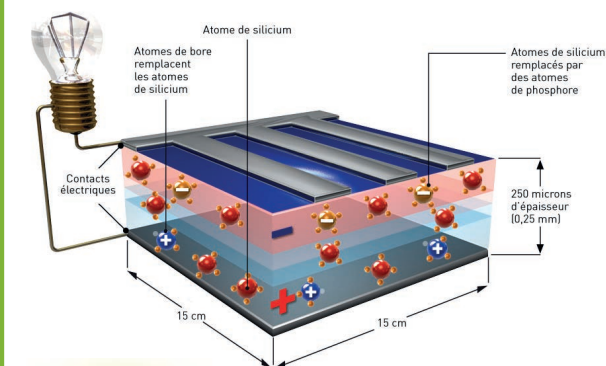
En France, pays qui offre le cinquième potentiel d'ensoleillement d'Europe, l'énergie solaire accuse pourtant un retard par rapport à ses voisins. Mais, avec la baisse sensible des prix des modules et la volonté politique affichée dans la loi « Énergie-Climat » de 2019, la puissance photovoltaïque installée devrait être multipliée par quatre ou cinq d'ici à 2030.

LES AVIEZ-VOUS ?

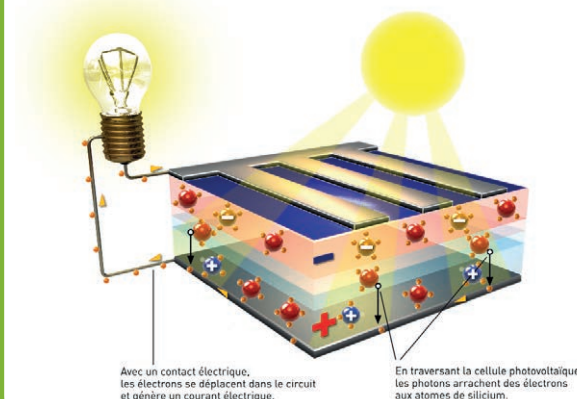
Les applications ont démarré en 1954, pour des satellites ou des produits grand-public comme les montres ou les calculettes.

COMMENT MARCHE UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ?

L'effet photoélectrique transforme les photons émis par le Soleil en électricité.



© Yvanodé / CEA



Avec un contact électrique, les électrons se déplacent dans le circuit et génèrent un courant électrique.

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium.

Plus de 77 000
installations
photovoltaïques ont
déjà été raccordées
en autoconsommation

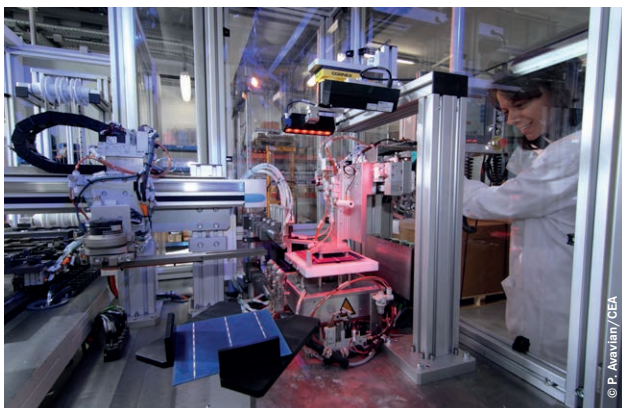
Les recherches sur le solaire photovoltaïque portent sur l'ensemble de la chaîne de la valeur des composants photovoltaïques : matériau, cellule, module et système.

Le silicium utilisé comme matériau de base des cellules doit être de haute qualité ; les travaux de recherche portent donc sur sa pureté et sa cristallisation ainsi que sur la fabrication des substrats. L'objectif est d'améliorer le rendement en gardant un coût modéré. Des architectures alternatives à l'architecture historique (dite à homojonction) sont notamment développées pour dépasser les 20 % de rendement. Le CEA a mis en particulier sur la technologie à hétérojonction, qui présente une consommation de matière réduite, un faible nombre d'étapes de fabrication et un potentiel de cadence de production élevé. Une unité représentative d'un pilote de

production a ainsi été mise en place à l'Ines, qui a permis un transfert industriel auprès d'un partenaire européen. À plus long terme, les recherches visent des rendements dépassant les 30 %, grâce à des technologies en rupture (par exemple les cellules Tandem silicium-pérovskites).

Les cellules sont ensuite assemblées en modules, qui peuvent avoir des puissances unitaires de plusieurs centaines de watts. Les modules sont ensuite intégrés dans des systèmes photovoltaïques dont l'arrangement physique (orientation) et électrique est conçu pour maximiser la production électrique. Un panneau solaire a une durée de vie moyenne de 20 à 30 ans. Dans une logique d'économie circulaire, des études pour limiter l'utilisation de matériaux critiques et recycler les composants sont intégrées dans l'approche globale des recherches sur cette filière.

→
Ligne de fabrication de
modules photovoltaïques.



Les chercheurs accompagnent aussi le développement à l'export des PME françaises du solaire, pour la vente de leurs technologies et équipements, ou la réalisation d'usines de modules photovoltaïques clés en main.

Les installations de production photovoltaïque ne se limitent pas aux grandes centrales au sol. Pour préserver les surfaces agricoles, elles sont également présentes sur les grandes toitures industrielles ou commerciales et également intégrées dans les bâtiments. À terme, le photovoltaïque deviendra la source majeure de production décentralisée avec les applications dans le bâtiment mais également avec l'intégration dans les routes, le mobilier urbain, ainsi qu'en soutien à la mobilité électrique.

Solaire thermique et solaire thermique à concentration

Le principe de la technologie solaire thermique est simple : des capteurs absorbent les photons solaires et les transforment directement en chaleur.

Cette chaleur est ensuite transmise à un liquide ou un gaz qui la transporte (on appelle cela un « fluide caloporteur ») vers un réservoir de stockage d'énergie. Elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau (sanitaire ou piscines) ou de locaux.

Les rendements peuvent atteindre jusqu'à 80 %. Sous nos latitudes, 4 m² de capteurs thermiques permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes et 10 m² assurent le chauffage d'une maison de 100 m². Ils permettent une autonomie énergétique à un coût modéré, sans nécessité de raccordement au réseau.

→
Banc d'ensoleillement artificiel pour
tester les performances de capteurs
solaire thermiques.

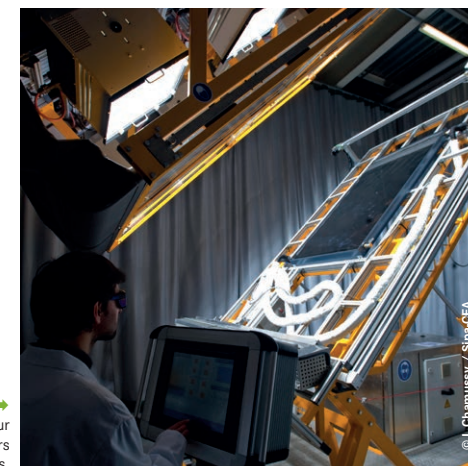
LE SAVIEZ-VOUS?

MAISON SOLAIRE

En France, le bâtiment représente plus de 40 % de la consommation d'énergie finale, devant les transports (25 %) et l'industrie (23 %), et génère, avec 123 millions de tonnes de CO₂, plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre par an. L'utilisation de l'énergie solaire est alors un moyen de tendre vers une sobriété énergétique. Les recherches portant sur des bâtiments à énergie positive vont encore plus loin puisque ceux-ci produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment.



→ Bâtiments expérimentaux instrumentés sur la plateforme
énergétique.





↑
Démonstrateur thermodynamique
de la plateforme solaire thermique à concentration.

L'énergie thermique du Soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique : la technologie la plus mature industriellement est l'utilisation de miroirs paraboliques longs d'une centaine de mètres. Ils concentrent la lumière sur un tube récepteur contenant un fluide caloporteur qui se réchauffe et génère ensuite de la vapeur qui est turbinée pour produire de l'électricité. Des projets industriels de grande taille ont été réalisés en Espagne, au Moyen-Orient, en Australie et au Maroc. Dans ces zones très ensoleillées, la rentabilité est prouvée : une centrale solaire thermodynamique est amortie au niveau énergétique en 5 mois environ (c'est-à-dire qu'elle aura produit plus d'énergie qu'en a nécessité sa construction et son démarrage).

Une autre technologie utilise des centaines de miroirs (héliostats) pour faire converger le rayonnement solaire sur une tour de grande hauteur, au sein de laquelle est placée une chaudière. Dans cette chaudière fonctionnant à très haute température, des liquides caloporteurs vont transporter la chaleur vers un réservoir d'eau et la transformer en vapeur qui va entraîner les turbines pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles. La puissance de ce type d'installation est de l'ordre de quelques mégawatts à une centaine de mégawatts. L'Espagne a inauguré près de Séville la centrale solaire nommée PS 10 avec 624 miroirs mobiles pour une puissance de 11 MWe, suivie en 2009 par PS20 de 20 MWe.



← Photobioréacteur à plaques
pour la culture de microalgues.

DE LA BIOMASSE AUX BIOCARBURANTS

Dans le domaine énergétique, la biomasse représente l'ensemble des matières organiques issues du monde végétal et animal pouvant être transformées en énergie. Il est possible de transformer cette biomasse en carburant à fort pouvoir calorifique appelé alors biocarburant. Cet atout intéresse de nombreux laboratoires de recherche dans le monde car, plus respectueux de l'environnement, les biocarburants sont une énergie neutre en carbone.

Trois générations de biocarburants

Le développement des biocarburants a vu le jour il y a une vingtaine d'années avec l'arrivée de la

1^{re} génération, qui utilise l'huile ou le sucre issus des céréales, de la canne à sucre ou de la betterave, pour les transformer en biodiesel ou en bioéthanol. Les biocarburants sont majoritairement utilisés sous forme d'additifs ou de compléments aux carburants fossiles. Les automobilistes trouvent aujourd'hui ces carburants à hauteur de 5 % du volume sous le nom de SP95-E5, et 10 % sous celui du SP95-E10. Quant au E85, il est composé de 65 % à 85 % de bioéthanol. Cependant, ces cultures occupent environ 3 % des surfaces agricoles, au détriment des productions alimentaires et papetières.

La 2^{de} repose sur la transformation des résidus forestiers et agricoles ou des déchets organiques.

Cette biomasse est également convertie en biodiesel ou en bioéthanol, obtenus par la recombinaison de gaz de synthèse ou par fermentation via des procédés enzymatiques et microbiens. Cette filière n'est pas encore prête pour les applications industrielles mais il existe des démonstrateurs capables de produire des biocarburants.

La 3^e génération, encore à l'état de recherche, est élaborée à partir de microorganismes photosynthétiques comme les algues ou les cyanobactéries. La réaction de photosynthèse de certaines d'entre elles produit

des lipides que l'on transforme en biocarburant. Malgré certains verrous scientifiques, de nombreux partenariats se créent, rapprochant la recherche et l'industrie. N'entrant pas en compétition avec le secteur de l'alimentation, les microalgues pourraient contribuer aux réponses face aux grands enjeux du XXI^e siècle.

Les défis scientifiques à relever

Depuis plus de dix ans, les microalgues et leur biodiversité sont étudiées par les chercheurs du CEA dans le but de sélectionner les souches les plus prometteuses.

Repiquage manuel de souches de microalgues, pour explorer leurs potentialités de production d'énergie (hydrogène, biodiesel).



En effet, la compréhension des mécanismes biologiques est une étape déterminante pour domestiquer les microalgues les plus à même de produire de grandes quantités d'énergie. Pour y parvenir, recherche appliquée et innovation industrielle conçoivent, démontrent et testent des méthodes de production qui devront, à terme, répondre aux besoins sociétaux et aux attentes de rentabilité économiques des acteurs industriels. Les récents progrès de la génomique, de la génétique ou de la lipidomique⁶, notamment développées au CEA, apportent de sérieux outils pour progresser dans ces domaines.

ZOOM SUR

LA CITÉ DES ÉNERGIES

La Cité des Énergies fait partie d'un projet ambitieux fixé au CEA par le gouvernement : favoriser la réindustrialisation du pays par le transfert de technologies au milieu industriel. Ainsi la Cité des Énergies est un lieu où sont développés de nouveaux bioprocédés dans le domaine des biocarburants de 3^e génération, de l'énergie photovoltaïque et de la remédiation (dépollution) des sols et des effluents.

La Cité des Énergies regroupe en un même lieu l'Institut de Biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille (BIAM), la plateforme CEA Tech - région Sud Paca et une future zone entrepreneuriale baptisée En'Durance Énergies. Elle rapproche ainsi la recherche fondamentale et appliquée, la formation universitaire et les filières industrielles du secteur pour devenir un pôle incontournable en termes de recherche et développement sur les énergies bas-carbone.



Centrales photovoltaïque et photovoltaïque à concentration de la plateforme de démonstration et d'expérimentation Megasol.

6- La lipidomique permet la caractérisation complète des lipides (huiles, acides gras) fabriqués et stockés au sein d'une cellule animale ou végétale.



Supervision des production et consommation

GESTION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Le développement de réseaux intelligents et de systèmes de stockage est indispensable pour adapter l'offre et la demande d'énergie.

PILOTAGE DES RÉSEAUX

Le développement des réseaux intelligents, appelés smart-grids, est indispensable pour intégrer plus d'énergies renouvelables sur le réseau électrique et répondre en temps réel aux usages qui évoluent. Pour y parvenir, des outils de pilotage sont nécessaires : nouvelles générations d'onduleurs pour intégrer ces technologies en courant continu sur des réseaux en courant alternatif, nouvelles batteries à faible coût pour le stockage courte durée de l'électricité, outils de prévision solaire optimisée avec prise en compte fine des données météorologiques, systèmes de communication performants, outils de gestion multi-échelle de l'équilibre entre l'offre et la demande.

De plus en plus, l'équilibre des réseaux passera par un couplage des différentes sources d'énergie (électricité, gaz, chaleur).

Les smart-grids : réseaux pilotables et intelligents

Les smart-grids gèrent l'ensemble de la chaîne énergétique, de la production à la consommation. Le système doit être piloté de manière très flexible pour gérer les contraintes liées à l'intermittence des énergies renouvelables, aux besoins de chauffage et d'électricité des particuliers et des industriels. Il doit aussi s'adapter aux évolutions des usages tels que le véhicule électrique, et également à la production d'hydrogène bas-carbone pour l'industrie.

Cette gestion nécessite le développement d'approches numériques de modélisation et d'intelligence artificielle.

Expérimentations et simulations sont complétées par des essais sur des plateformes dédiées dans lesquelles environnements réel et simulé sont mixés. Les chercheurs y ont recours soit pour tester le comportement d'un appareil (un onduleur photovoltaïque, une batterie ou un capteur solaire par exemple) connecté à un réseau virtuel, soit pour valider des stratégies de pilotage énergétique.

Cette salle de supervision permet de connaître en temps réel (données actualisées toutes les 5 secondes) la production et la dépense d'énergie électrique de toutes les installations de l'Ines.



© P. Avellan/CEA

Réseaux de chaleur et de froid

En France, les réseaux de chaleur et de froid, principalement alimentés par des énergies fossiles il y a dix ans, le sont aujourd'hui, à plus de 50 %, par des énergies renouvelables. Ils permettent de valoriser des ressources variées telles que la chaleur fatale¹ issue de procédés industriels, les déchets, la biomasse, la géothermie, ou encore l'énergie du Soleil avec le solaire thermique.

Un réseau de chaleur est un système de distribution d'énergie calorifique produite de façon centralisée, permettant de desservir plusieurs usagers à bas coûts. L'énergie est transportée par un fluide caloporteur via un réseau de distribution. Elle alimente à 90 % des bâtiments résidentiels et tertiaires, en grande partie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire en zone urbaine. Les réseaux de froid urbains sont, quant à eux, moins développés.

Mais l'augmentation des besoins en rafraîchissement va pousser leur développement dans les années à venir.

Les réseaux de chaleur du futur sont au cœur du concept de smart-grid énergétique à l'échelle locale, visant à interconnecter les vecteurs électriques, gaz/hydrogène et chaleur pour bénéficier des atouts de chaque réseau et contribuer à la décarbonation du système énergétique.

STOCKAGE

L'utilisation croissante des énergies renouvelables intermittentes implique un recours accru aux solutions de flexibilité et aux systèmes de stockage. La maîtrise de ces solutions permet d'adapter l'offre et la demande dans le temps.

Parmi les nouveaux usages, la mobilité électrique va nécessiter des moyens de stockage performants.

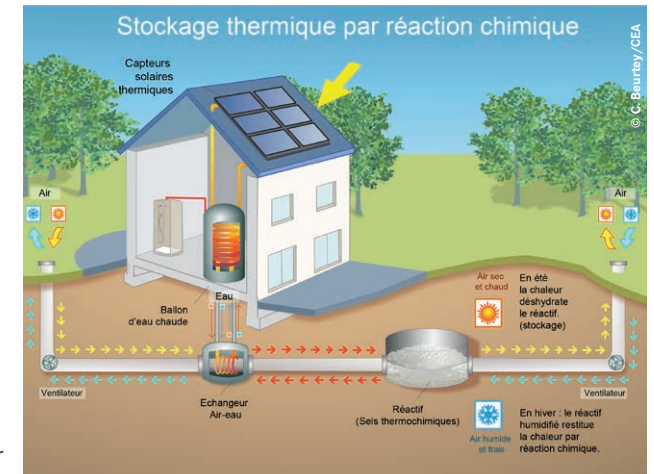
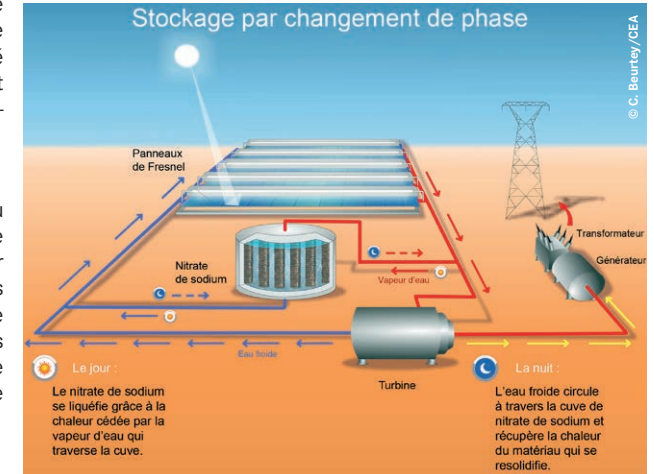
L'électrification des transports permet de répondre à un double enjeu : moins dépendre des produits pétroliers et contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Le stockage d'énergie doit pouvoir être intégré dans le véhicule électrique : c'est le cas des batteries et de l'hydrogène.

Stockage thermique

Le stockage de la chaleur, ou stockage thermique, constitue une solution de flexibilité pour le réseau énergétique. Les travaux de R&D portent sur le développement de systèmes physiques pour le stockage de la chaleur à court ou long terme (stockage intersaisonnier).

On distingue 3 technologies :

- le stockage par chaleur sensible, qui consiste à chauffer un fluide caloporteur ou un solide. La chaleur est ensuite récupérée en transférant l'énergie stockée vers un autre fluide. C'est le principe du ballon d'eau chaude, couplé à un panneau solaire thermique ;
- le stockage de chaleur par changement de phase, grâce à l'utilisation de matériaux dont la chaleur va entraîner le passage du ballon d'eau chaude, le déstockage se faisant par solidification du même matériau ;
- le stockage de chaleur par réaction chimique, qui met en œuvre une réaction chimique réversible, fortement endothermique dans le sens stockage et exothermique dans le sens opposé.



¹- Chaleur fatale ou de récupération : chaleur inutilisée générée par un procédé dont l'objectif premier n'est pas la production d'énergie.



↑
Cette ligne d'assemblage de modules et packs de batteries lithium est un démonstrateur industriel qui permet de faire du prototypage comme de la petite série.

Stockage batteries

Les batteries, technologies clés du transport électrique, sont un marché en pleine croissance. Un investissement important est notamment fait dans la recherche sur celles au lithium, en synergie avec l'effort européen.

Une batterie automobile est un assemblage d'accumulateurs élémentaires (plus de 7 000 dans le cas de la Tesla S) qui stockent l'énergie électrique issue de la circulation des ions au sein de l'électrolyte entre deux

électrodes, et des électrons dans un circuit extérieur. La chimie des matériaux, au cœur des travaux de recherche, permet de fabriquer des accumulateurs répondant aux spécificités de chaque application. Les principaux enjeux sont d'accroître de manière importante la densité d'énergie, la densité de puissance, la durée de vie et la sécurité d'utilisation, tout en minimisant l'impact environnemental des matières utilisées ainsi que les coûts énergétique et financier.

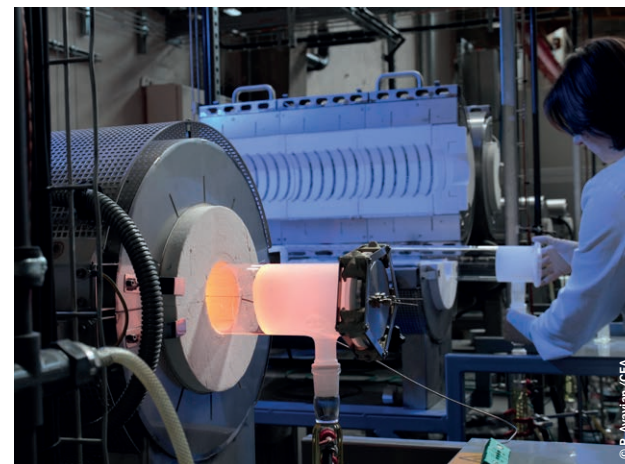
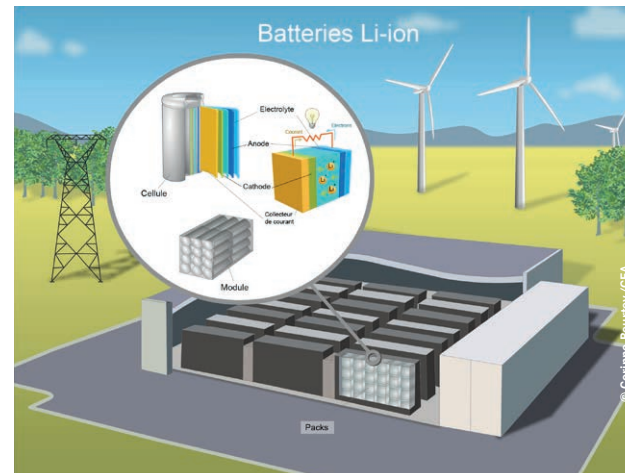
La technologie lithium-ion commence aujourd'hui à montrer ses limites. Pour accroître encore les densités d'énergie, une solution prometteuse est d'utiliser une électrode en lithium métal en lieu et place de l'électrode en graphite ou en composite graphite-silicium utilisée dans les générations actuelles de batteries. Cette nature d'électrode est incompatible avec l'utilisation d'un électrolyte liquide, elle nécessite donc d'opérer avec un électrolyte solide, d'où l'appellation batteries « tout solide ». Des chimies alternatives sont également à l'étude pour des applications très spécifiques (technologies lithium/soufre, accumulateurs Na-ion, supercondensateurs hybrides...).

Les batteries apporteront également progressivement un soutien au réseau électrique. En effet, elles pourront compenser, au moins partiellement, l'intermittence des énergies renouvelables.

VECTEUR HYDROGÈNE

L'hydrogène est aujourd'hui reconnu comme faisant partie des solutions pour réussir la transition énergétique. Véritable vecteur énergétique, il permet de passer d'une énergie (électricité, gaz, chaleur...) à une autre, via une pile à combustible ou un électrolyseur. Un surplus de production électrique peut ainsi être stocké massivement et durablement, puis restitué ou consommé directement. Outre le stockage, il permet de décarboner de nombreux secteurs de l'économie, en particulier l'industrie et les transports, fortement émetteurs de CO₂, sous réserve d'être lui-même produit à partir d'une électricité décarbonée.

Les travaux sur le vecteur hydrogène portent sur la filière complète : production (électrolyse), stockage (gaz comprimé, voie solide, voie liquide), conversions pour différents usages (mobilité hydrogène, hydrogène industriel, gestion des réseaux énergétiques).



↑
Qualification des matériaux pour des électrolyseurs de vapeur d'eau à haute température (EVHT) destinés à produire de l'hydrogène.



↑
Démoulage d'un liner polyuréthane
à l'issue d'un cycle de rotomoulage.

Production

Actuellement, 90 % de l'hydrogène utilisé dans l'industrie est produit par des procédés basés sur la décomposition d'hydrocarbures, comme le vaporeformage (dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur), tous émetteurs de gaz à effet de serre.

L'enjeu du développement de la filière repose sur la capacité à basculer vers une production massive d'hydrogène décarboné à un coût compétitif.

Le CEA travaille sur le procédé d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EVHT), qui a l'avantage de présenter des rendements de conversion élevés, et la particularité d'être réversible. Il a obtenu des résultats au meilleur niveau mondial avec une densité de courant de 2 A/cm². Les études technico-économiques montrent que les systèmes de production EVHT pourraient fournir un hydrogène à moins de 2 euros par kg d'ici 2030.

Stockage

Les chercheurs du CEA s'intéressent à différents modes de stockage de l'hydrogène :

- le stockage haute pression (350-700 bar) de l'hydrogène est développé majoritairement pour des applications mobilité.



↑
Cartographie des densités de courant
lors de l'analyse physico-chimique d'une pile à combustible.

Cette approche permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à un véhicule alimenté par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein. Les réservoirs hyperbares en cours de déploiement reposent sur une technologie comprenant une vessie en polymère, assurant l'étanchéité, entourée d'une coque composite pour la tenue mécanique. Les recherches actuelles visent à baisser les coûts par une meilleure maîtrise de la coque composite.

- le stockage basse pression en phase solide, quant à lui, consiste à absorber l'hydrogène dans des matériaux capables de le restituer à la demande.
- une troisième voie de stockage, réservée à des applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale, consiste à stocker l'hydrogène en deçà de -253 °C, sous forme liquide. Cette forme de stockage est également envisagée pour le transport aérien.

Conversion

Une pile à combustible (PAC) est un convertisseur électrochimique qui produit simultanément de l'électricité et de la chaleur en recombinant de l'oxygène et de l'hydrogène, avec de l'eau pour seul « rejet ».

Il existe plusieurs types de piles à combustible qui peuvent être classées en fonction de leur température de fonctionnement et de la nature de leur électrolyte².

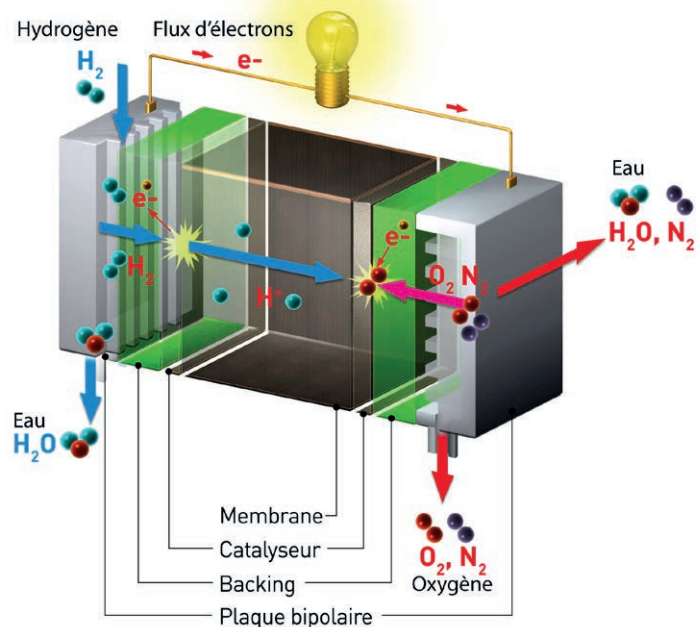
Les recherches du CEA portent sur deux technologies de PAC à électrolyte solide : les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC, pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) et les piles à oxydes solides (SOFC, pour *Solid Oxide Fuel Cell*).

Depuis les années 1990, les PEMFC sont développées pour des applications dans les transports. Elles fonctionnent à basse pression et à des températures de l'ordre de 80 °C.

La cellule électrochimique est constituée de deux électrodes, l'anode et la cathode, séparées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte. Les cellules sont regroupées, en série, par

2- Electrolyte : substance permettant le passage d'un courant électrique.

COMMENT FONCTIONNE UNE PILE PEMFC ?



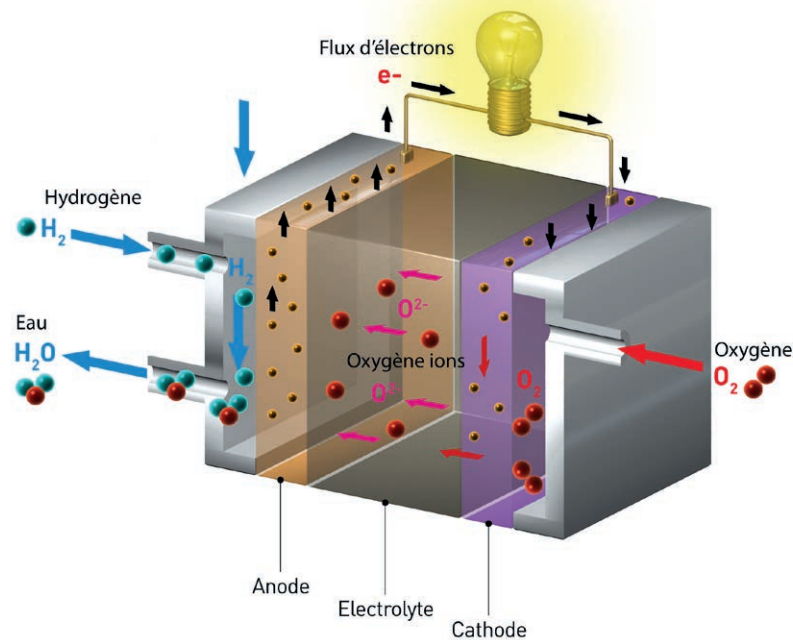
© Yuvarov / CEA

centaines, dans un ou plusieurs empilements, appelés « piles » ou « stacks ». Ces systèmes permettent d'envisager la conception de véhicules ayant des autonomies comparables aux véhicules thermiques, et donc supérieures à leur équivalent batterie.

La densité d'énergie volumique des piles étudiées au CEA avoisine aujourd'hui les 4 kW/L. Des transferts industriels ont été réalisés auprès de PSA, Symbio et Faurecia. Des recherches portent également sur les futures générations de PEMFC à base de composants imprimés.

Avec une puissance de sortie allant de 1 kW à 2 MW, les SOFC sont quant à elles plutôt destinées aux applications stationnaires en cogénération (électricité et chaleur) ou comme auxiliaires de puissance pour les transports.

COMMENT FONCTIONNE UNE PILE SOFC ?



© Yuvarov / CEA

ZOOM SUR

ENERGY OBSERVER, LE PREMIER BATEAU HYDROGÈNE À FAIRE LE TOUR DU MONDE

Le défi du projet Energy Observer : naviguer en totale autonomie énergétique et sans émission de gaz à effet de serre ni de particules fines. Pour réussir cette prouesse technologique, les ingénieurs-chercheurs du CEA ont développé une architecture énergétique autour de 2 ailes de propulsion intelligente, de panneaux photovoltaïques répartis sur 160 m² et associés à un système de stockage batteries et de deux moteurs électriques réversibles en hydrogénérateurs. Le bateau couple différentes sources d'énergies renouvelables pour produire son propre hydrogène à partir de l'eau de mer, le stocker à bord et l'utiliser ensuite dans une pile à combustible. Mis à l'eau en 2017, il a parcouru 18 000 miles nautiques en 2 ans de navigation.



↑ Maquette du catamaran Energy observer.

© D. Guillaud/CEA

Elles utilisent un électrolyte à base de céramique conductrice, qui implique des températures de fonctionnement élevées, de l'ordre de 800 °C. Plus tolérantes vis-à-vis du combustible et présentant de meilleurs rendements que les PEMFC, elles n'ont cependant pas encore atteint tous les objectifs technologiques nécessaires pour les fortes puissances, en raison notamment de leur fonctionnement à très hautes températures.

Transport de l'hydrogène

Le déploiement massif de l'hydrogène pourrait impliquer de le faire transiter par les réseaux de gaz naturel existants. Dans cet objectif, il est indispensable d'étudier les mécanismes de fragilisation, en présence d'hydrogène, des aciers qui constituent ces canalisations. De telles études sont menées au CEA, en partenariat avec les gestionnaires de réseaux.

Une autre approche, innovante, consiste à envisager le transport de l'hydrogène bas-carbone dans des milieux liquides (LOHC pour *Liquid Organic Hydrogen Carriers*) pour couvrir de grandes distances, en particulier pour le transport intercontinental par voie maritime.

MOBILITÉ DÉCARBONÉE, UN OUTIL DE FLEXIBILITÉ POUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

À l'échelle nationale, le secteur du transport de passagers ou de marchandises est responsable d'un quart des émissions de CO₂. Afin de diminuer cette empreinte carbone, il est nécessaire de développer des solutions alternatives plus respectueuses de l'environnement.

La France, à l'instar d'autres pays industrialisés, ambitionne un déploiement massif de la mobilité électrique incluant les véhicules hybrides rechargeables, les véhicules électriques à batteries ou à hydrogène. Le Contrat stratégique de la filière automobile a d'ailleurs fixé comme objectif une multiplication par cinq d'ici fin 2022 des ventes de véhicules 100 % électriques par rapport au niveau de 2017.

Véhicules connectés au réseau

La recharge solaire et le photovoltaïque embarqué font partie des expérimentations alliant solaire et véhicules électriques. Les ombrières de parking recouvertes de panneaux photovoltaïques associées à des bornes de recharge permettent le branchement de véhicules électriques, alors considérés comme consommateurs d'électricité.



© C. Maniglier/CEA

↑ Parking solaire avec bornes de recharge pour véhicules électriques.

Mais les batteries embarquées de ces véhicules pourraient aussi devenir des systèmes de stockage de l'énergie, sachant qu'un véhicule particulier passe la majorité de son temps en stationnement (50 % en permanence au domicile et 69 % des 6 heures par jour en moyenne pour les actifs). Le réseau pourrait y puiser l'électricité nécessaire pour répondre aux fortes demandes (lors des pics de consommation du début de soirée) ou pour pallier un manque ponctuel de production. On parle alors de *Vehicule-to-grid* (V2G) : le véhicule électrique alimente le réseau en fonction des besoins (modèle bidirectionnel) et lui offre un service de flexibilité.

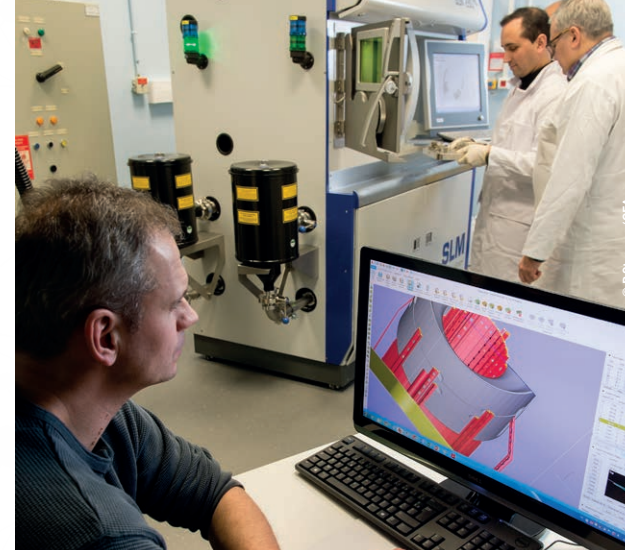
L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DES ÉNERGIES BAS-CARBONE

Les principes de l'économie circulaire s'articulent autour de 3 grands axes : réduire, prolonger, recycler.

La consommation de matières premières croît partout dans le monde, de même que l'énergie utilisée pour les transformer. Aujourd'hui, une matière peut être extraite en Afrique, transformée en Chine, utilisée en Europe.

L'économie circulaire consiste à repenser nos modes de production et de consommation en optimisant l'ensemble du cycle de vie des produits, en prenant en compte les aspects technologiques, sociétaux et économiques. Si les producteurs ont un rôle primordial à jouer en utilisant des matières premières produites de façon responsable, avec des procédés propres et sobres en énergie, il en est de même pour le consommateur. Il sera amené à changer son rapport aux objets, avoir une plus grande exigence sur leur provenance et leurs modes de fabrication, et privilégier le local. Mais pour que l'économie circulaire devienne une réalité, il faut développer de nouveaux modèles économiques et de nouvelles réglementations.

La filière nucléaire a développé une économie circulaire du cycle du combustible avec une industrie majoritairement implantée en France, une optimisation des procédés, un recyclage des matières et une gestion de la fin de vie des déchets. Fort de son expertise dans ce domaine, le CEA applique aujourd'hui ces mêmes principes à ses recherches sur les énergies renouvelables et plus largement sur les technologies de la transition énergétique.



Fabrication additive 3D. Prototypage d'une pièce métallique à partir d'un fichier CAO.

Concrètement, l'économie circulaire, ça consiste en quoi ?

Les principes de l'économie circulaire s'articulent autour de trois grands axes : réduire, prolonger, recycler.

RÉDUIRE

En amont de la production, l'écoconception permet de minimiser la quantité de matières, notamment critiques¹ et toxiques, de développer des procédés de fabrication sobres en énergie et moins polluants et dont les produits finaux seront plus facilement recyclables. À ce titre, le CEA mène des recherches sur l'impression 3D pour la fabrication de certaines pièces. Objectifs : limiter les rebuts de fabrication, concevoir des pièces impossibles à usiner « classiquement » ayant un intérêt fort en terme de fonctionnalité.

¹ Matière critique : matière qui présente à la fois de forts enjeux économiques et un risque d'approvisionnement lié aux quantités ou au contexte géopolitique.

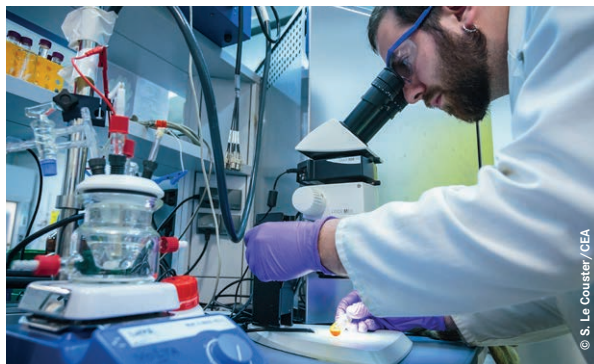
LES AVIEZ-VOUS?

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DU CARBONE

L'objectif de neutralité carbone inscrite dans la loi française, vise une réduction des émissions de CO₂ en France à 80 MtCO₂eq² en 2050 contre 445 MtCO₂eq émises en 2018. Or une partie de ces émissions, liée à l'utilisation de ressources fossiles dans les secteurs de la chimie, de l'acier et des carburants, ne peut être évitée, notamment parce que ces produits contiennent du carbone. Pour valoriser les émissions de ces industries, une solution consisterait à capter et réutiliser le CO₂ qu'elles contiennent. Le CEA explore trois pistes : faire réagir l'hydrogène et le CO₂ pour produire des carburants liquides ou gazeux, convertir directement le CO₂ en produits chimiques à partir d'énergie lumineuse ou électrique en s'inspirant par exemple de la photosynthèse des plantes, utiliser les microorganismes biologiques comme les microalgues pour produire des biocarburants de 3^e génération (voir p.26).

Mise au point de procédés de recyclage de matériaux à haute valeur ajoutée : récupération des métaux de batteries lithium-ions, synthèse et caractérisation de matériaux hybrides, séparation de métaux nobles...

2- L'unité MtCO₂eq signifie millions de tonnes en équivalent CO₂ ; c'est-à-dire la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) qui aurait la même capacité à retenir le rayonnement solaire qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre.



© S. Le Coustier / CEA

Dans le cas de pièces mécaniques par exemple, il est possible de les alléger par leur design, en déposant la matière exactement là où elle est indispensable à la tenue mécanique. Dans le cycle nucléaire français, le changement de technologie pour la fabrication du combustible a permis de diviser la consommation d'énergie d'un facteur 50.

PROLONGER

Il s'agit ensuite de prolonger la durée de vie des objets soit en les réparant, soit en leur offrant une seconde vie. Ainsi les batteries utilisées dans les voitures, dont les performances ont été réduites par les nombreux cycles de charges/décharges, pourraient être réaffectées à du stockage stationnaire d'énergie. Dans le nucléaire, la durée de vie d'une installation est réévaluée tous les 10 ans. Si tous les voyants liés à la sûreté-sécurité sont au vert, la vie de l'installation est prolongée.

RECYCLER

Lorsqu'ils arrivent en fin de vie, les objets doivent être mieux recyclés. Cela signifie optimiser leur collecte, séparer et récupérer les matériaux qui les composent mais aussi trouver des applications pour donner de la valeur à la matière recyclée. Les technologies de séparation des éléments développées au CEA pour le nucléaire sont aujourd'hui appliquées aux batteries pour récupérer le lithium et d'autres éléments de la cathode, comme le cobalt ou le nickel. Des travaux sont aussi menés pour recycler le silicium des panneaux solaires ou les terres rares des aimants permanents.



ENSEIGNANTS

CONSTRUIRE SON COURS
EN UTILISANT LES RESSOURCES DU CEA



“

Le CEA met à votre disposition différentes ressources et outils

Documentation, animations, vidéos, expositions, quiz, jeux... pour les classes de primaire, collège, lycée et supérieur, dans les disciplines suivantes : physique-chimie, technologie, sciences de la vie et de la Terre.

www.cea.fr/enseignants



ACCÉDEZ GRATUITEMENT À

DE NOMBREUSES RESSOURCES PÉDAGOGIQUES

Plus de 500 contenus, dont des ressources spécifiques aux thématiques des énergies et de la radioactivité, accessibles par niveaux scolaires et type de support.

UNE RUBRIQUE “ MÉTIERS SCIENTIFIQUES ”

Des fiches multimédias, des vidéos, des affiches pour faire découvrir les métiers de la recherche scientifique à vos élèves.

DES ACTIVITÉS POUR LA CLASSE

Des travaux pratiques adaptés au programme de lycée de physique-chimie et SVT, des idées de sortie de classe, des vidéos d'expériences scientifiques, un jeu de l'oie sur les énergies...

CEASCOPE



Le rendez-vous de la culture scientifique du CEA



Restez informé sur tous nos nouveaux contenus en vous abonnant à notre newsletter.

LA COLLECTION

- 1 > L'atome
- 2 > La radioactivité
- 3 > L'homme et les rayonnements
- 4 > L'énergie
- 5 > L'ADN
- 6 > Les réacteurs nucléaires
- 7 > Le cycle du combustible nucléaire
- 8 > La microélectronique
- 9 > Le laser
- 10 > L'imagerie médicale
- 11 > L'astrophysique nucléaire
- 12 > L'hydrogène
- 13 > Le Soleil
- 14 > Les déchets radioactifs
- 15 > Le climat
- 16 > La simulation numérique
- 17 > Les séismes
- 18 > Le nanomonde
- 19 > Énergies du XXI^e siècle
- 20 > La chimie pour l'énergie



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2017
Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif sur Yvette cedex - www.cea.fr

ISSN 1637-5408.

Ce livret a été édité avec le soutien de la Casden

