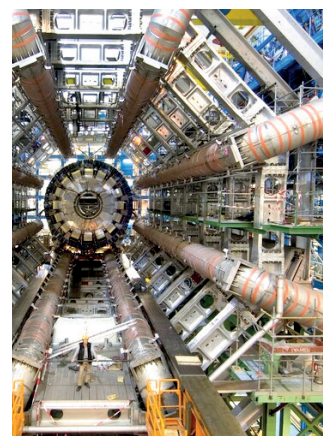
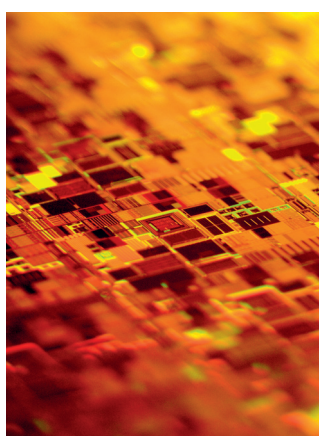
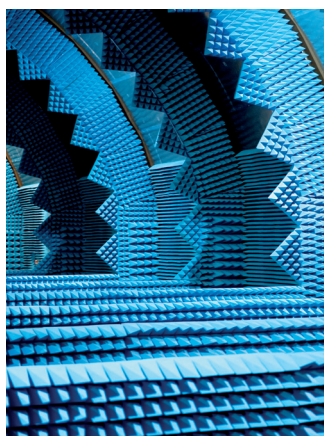




—
**PENSER
LE MIX
ÉNERGÉTIQUE**
**LA VISION
DU CEA**

Le rôle du CEA est d'éclairer la décision publique et de donner les moyens scientifiques et technologiques aux forces vives (entreprises et collectivités), pour mieux maîtriser les mutations sociétales majeures : transition énergétique, numérique, santé du futur, défense et sécurité globale. Ses 20 000 collaborateurs et collaboratrices travaillent au cœur des territoires dans 9 centres équipés de très grandes infrastructures de recherche, dans le cadre de partenariats académiques et industriels en France, en Europe et à l'international.



Acteur majeur de la recherche, du développement et de l'innovation, le CEA intervient dans quatre domaines :

- **LES ÉNERGIES BAS-CARBONE**
(NUCLÉAIRE ET RENOUVELABLES)
- **LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ**
- **LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE POUR L'INDUSTRIE**
- **LA RECHERCHE FONDAMENTALE**
(SCIENCES DE LA MATIÈRE ET SCIENCES DE LA VIE)

Depuis sa création, l'organisme s'engage au service de la souveraineté scientifique, technologique et industrielle de la France et de l'Europe, pour un présent et un avenir mieux maîtrisés et plus sûrs.

Il apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation pour la mise en œuvre d'un système énergétique bas-carbone.

Avec une approche intégrée du système énergétique, le CEA mène des travaux sur les modes de production d'énergie bas-carbone (énergie nucléaire, solaire PV, NTE), leurs interactions au sein du réseau (stockage, pilotage, conversion), la problématique des ressources dans une logique de cycle fermé des matières, le tout prenant en compte les dimensions technico-économiques, environnementales et sociétales.

Avril 2023.

Crédit photographies et illustration : Page 2 : A. Aubert/CEA ; C. Jandaureck/CADAM/CEA ; P. Stroppa/CEA ; P. Stroppa/CEA. Page 3 : www.Photo-Paysage.com. Page 5 : L. Rhin/CEA. Page 6 : A. Aubert/CEA. Page 7 : PF. Grosjean/CEA.

Plus d'informations sur notre site www.cea.fr

LE CONTEXTE ■

L'urgence climatique et la crise énergétique actuelles imposent d'amplifier, encore davantage, la transition des systèmes énergétiques vers les énergies bas-carbone. Celles-ci permettent de réduire à la fois les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance de la France aux pays producteurs de pétrole et de gaz.

Malgré de nombreuses incertitudes, cette transition doit s'accélérer dès maintenant car les conséquences négatives de l'inaction sont, quant à elles, certaines.

La France a initié les accords de Paris et s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050. Avec ses partenaires de l'Union européenne, elle s'est également donnée des objectifs intermédiaires ambitieux, comme une baisse des émissions de gaz à effet de serre de 55 % en 2030 au titre du « Pacte vert » européen, le développement d'une filière de production d'hydrogène bas-carbone et l'arrêt de la vente de véhicules neufs à moteur thermique en 2035.

Si la consommation générale d'énergie devrait baisser grâce à des économies d'énergie (efficacité et sobriété), l'électrification croissante des usages se traduira par le besoin de disposer de quantités massives d'électricité bas-carbone dès la décennie 2030. Cette électricité devra être compétitive et permettre à la France de poursuivre ses ambitions de réindustrialisation.

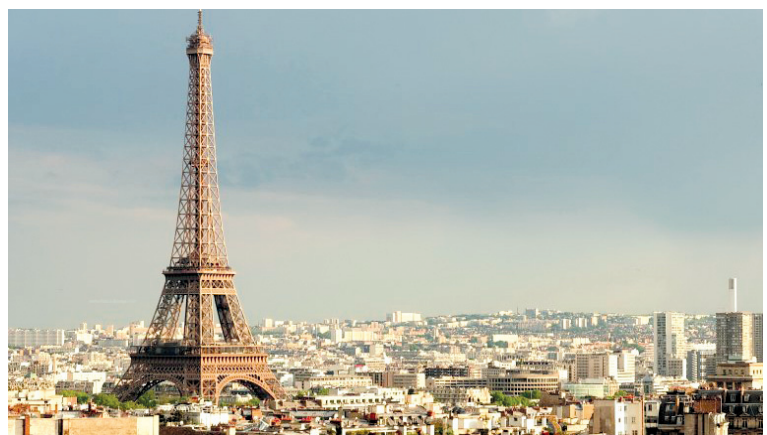
La France, sixième puissance économique mondiale, dispose d'atouts majeurs pour réussir cette transition : un mix de production électrique déjà décarboné à plus de 90 % avec des coûts de production inférieurs à la moyenne européenne, une main d'œuvre qualifiée, des savoir-faire techniques et un socle de R&D de premier plan.

Notre pays doit pour autant faire face à des défis qui lui sont propres : peu de matières premières sur son sol, la nécessité de renouveler une partie importante de son

parc de production d'électricité dans les prochaines décennies, des filières industrielles intégrées à construire ou à renforcer, et la nécessité d'y attirer les talents.

Les pouvoirs publics préparent en 2023 plusieurs textes majeurs : la Loi de Programmation Energie Climat, la Stratégie Nationale Bas-Carbone et la Programmation Pluriannuelle de l'Energie. Les ambitions définies dans ces textes et leur mise en œuvre dans la durée seront clés pour réussir la transition énergétique de la France.

Ce document est une contribution du CEA au débat, qui expose les grands principes qu'il semble nécessaire de suivre pour réussir cette transition majeure de nos systèmes énergétiques en minimisant les risques et les coûts, et atteindre au plus vite la neutralité carbone.



QUELS LEVIERS POUR ATTEINDRE NOS OBJECTIFS « NET ZERO » POUR 2050 ? ■

1 | **CONSTRUIRE UN MIX DE PRODUCTION BAS-CARBONE DIVERSIFIÉ, ASSURANT SOUVERAINETÉ ET COMPÉTITIVITÉ**

Pour remplacer les énergies fossiles qui représentent aujourd'hui plus de 60% du mix énergétique et atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, il est indispensable d'arrêter tout nouvel investissement dans ces énergies et nécessaire de mobiliser l'ensemble des technologies bas-carbone :

- développer de manière massive des technologies renouvelables (solaire, éolien sur terre et en mer, biomasse, biogaz, hydraulique...);
- prolonger des réacteurs nucléaires en activité, dans le respect des exigences de sûreté;
- lancer un nouveau programme nucléaire limitant les risques et les incertitudes pour le mix électrique futur.

Recourir à l'ensemble des technologies bas-carbone actuellement disponibles permettra, en outre, d'accroître la sécurité d'approvisionnement en s'émancipant au plus vite des importations d'énergies

fossiles et de leurs variations de prix, et ce au meilleur coût (source : RTE Futurs énergétiques 2050).

Pour autant, des efforts resteront à réaliser pour lever les verrous technologiques permettant de décarboner des secteurs difficiles à électrifier, tels que certains procédés industriels ainsi que la mobilité lourde (ferroviaire, maritime, aérien). À cet égard, les usages non électrogènes du nucléaire auront un rôle clé à jouer, notamment pour produire de la chaleur, de l'hydrogène ainsi que des molécules dérivées pour la chimie et les carburants.

Ces solutions devront être proposées à différentes échelles territoriales. Le développement de moyens de production adaptés à ces enjeux, comme les réacteurs modulaires de petite taille (SMR) ou des plateformes de production d'hydrogène bas-carbone, permettront de réduire le développement des réseaux et de favoriser l'émergence de boucles locales de production et de consommation.

2 | **DÉVELOPPER UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE PLUS FLEXIBLE ET SON COUPLAGE AVEC LES AUTRES FORMES D'ÉNERGIE (CHALEUR, HYDROGÈNE)**

Accompagner la sortie des combustibles fossiles facilement stockables, tout en proposant un système optimisé présentant les meilleures marges de sécurité et de qualité de l'approvisionnement, requiert de développer la flexibilité du système électrique dans toutes ses dimensions :

- en activant tous les leviers disponibles au niveau de la demande, notamment au travers d'offres de fourniture incitatives et d'outils de pilotage et de suivi adaptés des consommations;
- en renforçant les capacités de production pilotables décarbonées;

- en augmentant les moyens de stockage de l'électricité : barrages réversibles (« STEPs »), batteries stationnaires, mobilisation des batteries de véhicules, hydrogène, chaleur, etc ;
- en accroissant les interconnexions avec les pays voisins;
- en créant une architecture des réseaux adaptée à la production et à la demande locale, permettant d'optimiser l'ensemble des leviers de flexibilité.



Représentation d'un mix énergétique bas-carbone à l'horizon 2050

Ce schéma illustre l'approche intégrée des énergies, qui repose sur divers moyens de production, de stockage et de conversion entre les différentes formes d'énergies bas-carbone. Dans cette approche, les consommateurs deviennent aussi les producteurs.

Un territoire repose sur une boucle énergétique locale, avec ses énergies bas-carbone spécifiques. Chaque territoire doit satisfaire des besoins (industries, population, climat) et dispose de ressources (nucléaire, vent, soleil, biomasse) qui lui sont propres.

3 | RÉDUIRE LES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ET L'EMPREINTE CARBONE

La transition vers la neutralité carbone impose une forte réduction de la consommation d'énergie, grâce à plus d'efficacité énergétique et à un recours accru à des pratiques de sobriété. Ces dernières doivent être appliquées partout où elles sont possibles, en interrogeant les usages, aussi dans le domaine du numérique. La consommation d'énergie doit être minimisée, notamment via l'isolation des bâtiments.

La réduction de la consommation totale d'énergie passe par un usage plus important de l'électricité, qui se substituera dans de nombreux usages à des énergies fossiles émettrices de CO₂, tout en accroissant l'efficacité énergétique.

Il semble également nécessaire de relocaliser certaines activités aujourd'hui situées dans des pays à fortes émissions, afin de pouvoir réduire la part de l'empreinte carbone nationale associée aux importations. En effet, alors que les émissions de CO₂ sur le territoire national diminuent depuis 2005, les émissions dites « importées » continuent d'augmenter.

Enfin, il reste essentiel de sensibiliser davantage et de mieux informer les consommateurs sur leur empreinte carbone effective. À cet égard, les mesures visant à rendre visible voire obligatoire l'affichage des bilans carbone sont à promouvoir.

4 | RÉUNIR LES CONDITIONS D'ÉMERGENCE D'UNE FILIÈRE HYDROGÈNE ET CARBURANTS DE SYNTHÈSE

À condition qu'il soit produit par des voies ne conduisant pas à des émissions significatives de carbone, l'hydrogène présente l'intérêt d'être d'une part un vecteur énergétique de choix pour certaines industries ou la mobilité lourde et, d'autre part, un outil de flexibilité du mix électrique. En effet, en période de sur-production électrique, l'électricité peut être stockée (batteries, STEPs) mais aussi être utilisée pour produire de l'hydrogène facilement stockable.

S'agissant spécifiquement de la mobilité, tous les besoins ne pourront pas être couverts par les moteurs électriques et leurs batteries. Pour la mobilité lourde (transports routier, aérien ou maritime), le recours à l'hydrogène, en très grandes quantités, et aux carburants de synthèse, devrait s'avérer indispensable. Il en va de même pour certaines activités industrielles (sidérurgie, engrais, etc.) dans lesquelles l'hydrogène pourrait rapidement se substituer aux énergies fossiles.

Par ailleurs, l'hydrogène peut être combiné à du carbone (capturé dans l'atmosphère, piégé à la source d'émission industrielle par exemple) pour reconstituer des chaînes carbonées, en utilisant

une énergie bas-carbone. Des verrous scientifiques et techniques, et des questions de rendement et de rentabilité économique restent à lever, mais cette piste est à explorer et à ne pas négliger.

Se doter de la capacité et des infrastructures de production (par exemple par électrolyse de l'eau à partir d'une électricité bas-carbone), de transport, et de stockage d'hydrogène décarboné est donc un pan important de la stratégie énergétique de décarbonation.



5 | RENFORCER L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

L'électrification des usages et le développement des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) entraînera une hausse de la demande en matériaux et ressources critiques. Alors que leur extraction et raffinage sont fortement concentrés au sein d'un petit nombre de pays, la question de la sécurité d'approvisionnement revêt une importance capitale.

La décarbonation de l'économie doit donc s'accompagner d'une démarche d'économie circulaire afin de réduire les impacts environnementaux des technologies et d'économiser les matières.

Cet objectif, qui doit rassembler pouvoirs publics en charge de la régulation, entreprises et consommateurs, commence par la prolongation de la durée de vie des équipements, afin de repousser au maximum leur obsolescence et de favoriser le recyclage de leurs composants valorisables.

Ces derniers doivent pouvoir être remplacés et mis à jour, ce qui suppose une conception adéquate, ainsi que le transfert (à toutes les étapes de vie du produit) des informations concernant sa composition et son montage.

Dans cette optique, le recyclage des métaux et ressources critiques utilisés dans la production et le stockage d'énergie doit être une priorité.

Appliquée à l'industrie nucléaire, l'économie circulaire se traduit dans la fermeture du cycle du combustible permettant la souveraineté énergétique et la durabilité de cette énergie sur le temps long. La fermeture du cycle du carbone représente aussi un enjeu majeur pour valoriser le carbone atmosphérique ou industriel, afin de le recycler dans certaines applications comme les carburants de synthèse, en substitution aux énergies fossiles.

L'économie circulaire des énergies bas-carbone aura pour enjeu clé de développer des filières françaises et européennes permettant de conserver les matières premières et la valeur ajoutée de leurs procédés de mise en œuvre, en France et en Europe.

LA R&D ET L'INNOVATION DU CEA : DES ACTIONS DANS LA DURÉE, POUR ACCÉLÉRER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ■



La vision d'ensemble proposée par le CEA au travers de son approche intégrée du mix énergétique vise à promouvoir toutes les options permettant d'aller vers la neutralité carbone en 2050, au moindre coût pour la société et en renforçant la souveraineté du pays.

Le CEA ambitionne de contribuer à l'avènement d'un mix énergétique décarboné qui s'appuie sur les technologies existantes et celles nouvelles qui sont à développer et seront disponibles avant 2050. Il ne faudra pas négliger les contraintes de temps qui s'imposent à la recherche et à l'industrie ainsi que les délais et les freins liés à l'adoption de ces technologies par la société.

■ S'APPUYER SUR LES TECHNOLOGIES DÉJÀ MAÎTRISÉES (NUCLÉAIRE ET RENOUVELABLES)

Pour atteindre son objectif de neutralité carbone d'ici 2050, la France doit garder un mix énergétique qui associe nucléaire et renouvelables, sur la base de technologies déjà maîtrisées et dont les coûts sont compétitifs. En effet, au vu des connaissances actuelles, la combinaison du nucléaire et des énergies

renouvelables fait pleinement sens, que ce soit pour des raisons techniques, économiques, stratégiques et de souveraineté. Surtout, dans une approche systémique, renoncer aujourd'hui à l'une de ces technologies rend l'atteinte de l'objectif de décarbonation incertain et plus coûteux.

■ PRENDRE EN COMPTE L'ENJEU DU TEMPS LONG

Le mix énergétique tel qu'il sera défini dans la perspective de tenir l'objectif de neutralité carbone aura un impact jusqu'à la fin de ce siècle. Les orientations et engagements à prendre, tant scientifiques que technologiques, doivent donc conduire à privilégier des innovations dans le cadre de trajectoires maîtrisées.

D'ici à 2050 de nouvelles avancées technologiques vont voir le jour, que ce soit au niveau de la production ou de la consommation d'énergie ou des évolutions dans le mode de vie des Français. La prise en compte de ces évolutions nécessitera de reconsidérer périodiquement les différentes options et les trajectoires

de décarbonation. Si des évolutions graduelles sont à attendre, il sera primordial d'anticiper et de donner de la visibilité. Tout « stop and go » sera susceptible de ralentir considérablement le déploiement des options et l'adhésion de la société, avec pour conséquence un impact inévitable sur l'atteinte de nos objectifs à horizon 2050.

Pour ce faire, il est nécessaire de sécuriser dans la durée les financements de la recherche française afin de se doter d'outils expérimentaux permettant d'explorer de nouvelles voies, d'industrialiser de nouvelles filières, d'optimiser et de réduire les risques et les impacts des filières existantes.

LE CEA, ACCÉLÉRATEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ■

Porteur d'une vision intégrée des systèmes énergétiques, le CEA a défini **9 priorités** pour accélérer la transition énergétique.

1 | L'INNOVATION NUCLÉAIRE POUR LES RÉACTEURS :

contribuer au développement du projet Nuward, petit réacteur modulaire (SMR), réunissant les acteurs de la filière française et des acteurs européens; développer de nouveaux concepts de réacteurs, avec de nouveaux usages pour l'approvisionnement en énergie des territoires et des sites industriels à forte consommation énergétique, à l'image des SMR non électrogènes ou couplés (production de chaleur ou d'hydrogène) ou des petits réacteurs nucléaires avancés (AMR).

2 | LE FUTUR DU CYCLE NUCLÉAIRE :

développer de nouveaux procédés pour améliorer les usines du cycle et préparer leur évolution dans la perspective de la fermeture du cycle du combustible.

3 | LE PHOTOVOLTAÏQUE :

développer des cellules à haute performance et des panneaux pour des usages variés permettant d'intégrer largement le photovoltaïque (PV « everywhere » et PV « grid-friendly »).

4 | LE DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE :

développer et industrialiser l'électrolyse (créer des GigaFactories), les piles à hydrogène pour la mobilité et le stockage de l'hydrogène ou sa conversion dans des molécules d'intérêt.

5 | LES BATTERIES :

développer des batteries de nouvelle génération, plus performantes (capacité, recharge, cycles, coût) et sûres avec des systèmes intelligents de gestion de l'énergie.

6 | LES RÉSEAUX INTELLIGENTS :

développer les outils de simulation et pilotage et faire émerger une plateforme nationale ouverte pour qualifier les technologies et services innovants.

7 | L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE :

développer des méthodes et procédés pour concevoir, fabriquer de manière sobre et durable, puis recycler les éléments du système énergétique.

8 | LE RENFORCEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME INDUSTRIEL ET L'ACCÉLÉRATION DE SON DÉVELOPPEMENT :

contribuer à une offre industrielle compétitive en France et en Europe, faire émerger de nouvelles solutions avec des transferts technologiques, réduire les délais de développement et d'industrialisation.

9 | LES ÉTUDES SOCIO ET TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE SYSTÈMES ET SCÉNARIOS :

contextualiser les développements technologiques et contribuer à éclairer les décisions.



Pour mener à bien ses travaux, le CEA conduit une politique volontariste en matière de moyens expérimentaux, parc d'installations et plateformes de recherche, et de simulation (codes et moyens de calcul).

Le CEA explore des solutions permettant d'aller vers un mix énergétique français bas-carbone, équilibré, souverain, permettant de garantir la sécurité des approvisionnements, des prix abordables pour les consommateurs et d'accélérer la transition vers la neutralité carbone.