



---

## **Identifier les verrous pour accélérer les développements industriels indispensables à la transition écologique**

---

Novembre 2012



# **Identifier les verrous pour accélérer les développements industriels indispensables à la transition écologique**

**Novembre 2012**



## Introduction

La croissance démographique et économique mondiale pose un quadruple défi, de disponibilité énergétique, de préservation de l'environnement, de limitation du risque climatique et de gestion économe des matières premières, et ce en relation directe avec l'impératif d'un développement durable.

Comment satisfaire des besoins énergétiques croissants tout en limitant l'impact de l'activité humaine associée sur le fonctionnement de la planète et de ses écosystèmes ? Comment concilier cette consommation d'énergie indispensable à l'activité humaine avec une exploitation maîtrisée des ressources naturelles, des émissions réduites de gaz à effet de serre actuellement liées à la consommation massive de combustibles fossiles et une production de déchets autres non-recyclables de plus en plus faible ?

Une solution semble s'imposer : elle repose sur un triptyque : sobriété , efficacité et décarbonisation, c'est-à-dire passer d'un modèle énergétique mondial basé à plus de 80 % sur l'usage des énergies fossiles qui s'épuisent vers un modèle où domineront de manière complémentaire les énergies renouvelables et nucléaires, qui possèdent la capacité de relever les défis mentionnés ci-dessus.

Cette transition énergétique nécessite le développement de moyens de production d'énergie à faible niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> permettant la réduction concomitante de l'impact des énergies fossiles, et préservant ainsi la possibilité de prolonger pendant de nombreuses années le bénéfice de leurs usages ciblés non aisément substituables. Elle doit également s'accompagner d'une meilleure efficacité énergétique des technologies les plus consommatrices et d'une modification du comportement des usagers. Enfin, des outils de suivi et de prospective énergétique sont indispensables pour orienter les politiques publiques et la recherche technologique dans le domaine de l'énergie.

Ces enjeux sont au cœur des réflexions programmatiques coordonnées parmi l'ensemble des opérateurs publics de recherche rassemblés dans l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), en étroite interaction avec les entreprises et les agences de financement.

L'objet de ce rapport est de présenter le résultat d'un des objectifs prioritaires que l'Alliance s'est fixé dès sa création en 2009 : identifier les verrous scientifiques, technologiques, économiques et sociétaux qui limitent les développements industriels indispensables à la transition écologique dans le domaine de l'énergie.



---

## Énergies issues de la biomasse

*La biomasse végétale, sous toutes ses formes (plantes sucrières et amylacées, oléagineux, lignocellulose, algues), constitue une importante réserve d'énergie. A l'heure actuelle, elle est déjà utilisée pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que de biocarburants de première génération à partir de sucres et d'huiles végétales. Ces filières matures sont cependant pénalisées par la concurrence avec l'usage alimentaire et un bilan d'émissions de gaz à effet de serre parfois peu favorable. D'autres technologies de conversion sont donc explorées pour la production de biocarburants, en particulier les voies thermochimique et biologique. L'ANCRE a pris en compte l'ensemble de ces filières dans son analyse.*

### Les verrous

Les filières thermochimiques regroupent la pyrolyse, la combustion et la gazéification, cette dernière opération permettant de produire des biocarburants de synthèse de deuxième génération. Deux principaux verrous freinent leur développement : la présence dans la biomasse de composés inorganiques, de poussières et de goudrons altérant les installations, et le problème de l'adéquation de la biomasse avec ses utilisations techniques. En effet, les propriétés très inégales (densité, granulométrie, humidité, etc.) de la biomasse selon sa source nécessitent une préparation adaptée à l'utilisation souhaitée.

La voie biologique est quant à elle pénalisée par la complexité des opérations de déconstruction de la biomasse lignocellulosique, ainsi que par le développement insuffisant et le coût de production élevé de micro-organismes et/ou d'enzymes.

De leur côté, si les micro-organismes – et notamment les microalgues – ont un potentiel de rendement bien supérieur à la biomasse terrestre, les ruptures technologiques nécessaires pour optimiser les souches et développer des procédés adaptés doivent faire l'objet d'une analyse approfondie afin de déterminer la viabilité économique et environnementale de cette filière, dite de troisième génération.

Enfin, deux verrous pénalisent l'ensemble de ces filières : l'absence d'outils pour gérer la disponibilité et la pérennité des ressources en biomasse, ainsi que le manque d'évaluations technico-économiques et environnementales des différentes filières, et notamment de la troisième génération.



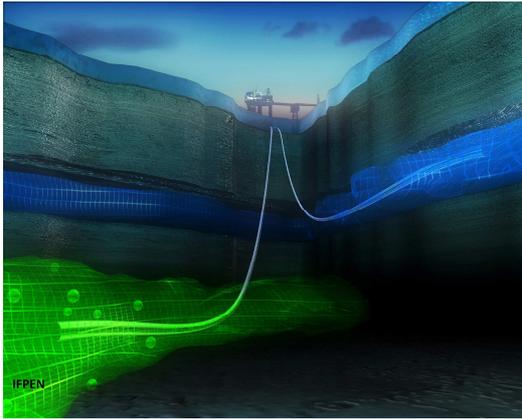
---

## Énergies fossiles et géothermiques

*Les ressources fossiles représenteront encore plus de 60 % du bouquet énergétique mondial en 2030. La réduction de leur impact environnemental, notamment vis-à-vis du changement climatique, est plus que jamais cruciale. Les travaux de l'ANCRE ayant été axés sur l'utilisation et l'impact environnemental des ressources fossiles, l'évaluation de la ressource charbonnière n'a pas été abordée. En revanche, l'ANCRE a élargi la définition courante des énergies fossiles aux métaux dits "stratégiques", appelés à jouer un rôle croissant dans les filières d'énergie décarbonée (batteries, énergies renouvelables et décarbonées, etc.). L'autre ressource étudiée par l'ANCRE est la géothermie, appliquée à la production de chaleur et d'électricité.*

### Les verrous

Dans le domaine des énergies fossiles, pour assurer une transition énergétique soutenable, il faut à la fois augmenter le taux de récupération des huiles et gaz conventionnels et produire de nouvelles réserves difficiles d'accès, comme les huiles et les gaz non conventionnels, tout en minimisant l'empreinte environnementale de leur exploitation. Un autre enjeu est l'utilisation décarbonée de ces ressources, par la mise en œuvre du captage, du stockage et de la valorisation du CO<sub>2</sub>.



Les métaux stratégiques partagent plusieurs caractéristiques avec les hydrocarbures (ressources limitées, concentration géographique, impacts environnementaux, etc.) et joueront un rôle majeur dans l'essor des énergies renouvelables. Leur recensement, l'amélioration de leur exploitation et de leur recyclage par la connaissance des processus de concentration et d'enrichissement, ainsi que le développement de technologies sûres et propres, sont essentiels.

Le développement de la filière géothermique est freiné par deux verrous principaux : la connaissance du potentiel des bassins sédimentaires et des systèmes volcaniques et magmatiques d'une part, l'amélioration des procédés d'exploitation de la chaleur, à haute

comme à basse température, d'autre part. La valorisation des fluides émis dans les champs géothermiques offre quant à elle une nouvelle opportunité pour la production d'hydrogène.

Enfin, l'acceptabilité sociale de l'exploitation de ces ressources énergétiques devra faire l'objet d'une attention particulière. Elle impose l'implication des sciences humaines et sociales dans les programmes de recherche.

---

## Énergies nucléaires

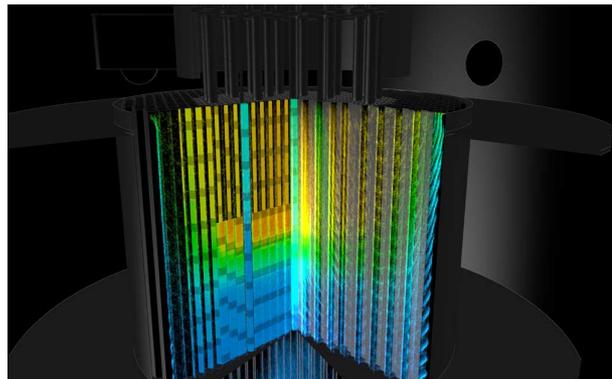
*Le nucléaire fait partie des énergies qui émettent le moins de CO<sub>2</sub>. Il a donc un rôle essentiel à jouer dans la construction d'un avenir énergétique décarboné. La recherche française dans ce domaine étant déjà très structurée, l'ANCRE s'est concentrée sur de nouvelles opportunités de coopérations susceptibles de renforcer et d'accélérer les programmes en cours, en particulier ceux dédiés aux deux enjeux majeurs que sont la sûreté des réacteurs et la gestion des déchets radioactifs. Les axes de travail retenus couvrent tous les types de réacteurs (réacteurs à eau en exploitation ou en construction, futures générations de réacteurs à neutrons rapides et à fusion), ainsi que les contributions possibles du nucléaire à d'autres applications que la production d'électricité : chaleur, hydrogène, carburants de synthèse, etc.*

### Les verrous

Le maintien au meilleur niveau d'outils de **modélisation et de simulation numérique** des réacteurs nucléaires et du cycle du combustible associé est un enjeu majeur pour le fonctionnement et la sûreté des installations et la compétitivité de l'industrie nucléaire française.

La simulation numérique fera aussi progresser certains domaines de la **chimie**, dont le développement a beaucoup reposé sur l'expérience (cycle du combustible, circuits de refroidissement des réacteurs, gestion des déchets radioactifs, impact environnemental, etc.). Cet objectif conduira à concevoir une plateforme numérique qui fédère les outils de simulation des principaux processus physico-chimiques intervenant dans les réacteurs et le cycle du combustible.

La recherche sur les **matériaux** doit progresser afin de mieux évaluer le vieillissement des composants dans les réacteurs actuels, développer la modélisation multi-échelle pour fonder les autorisations de prolongation d'exploitation sur des bases plus scientifiques et développer de nouveaux matériaux pour les réacteurs à neutrons rapides, les réacteurs à fusion et le conditionnement des déchets radioactifs.



L'**instrumentation** nécessaire au contrôle, au pilotage et à la sécurité des installations nucléaires doit

bénéficier des progrès de la recherche amont (physique) et d'autres secteurs (aéronautique par exemple) en matière de mesures, de transmission et de traitement du signal.

Enfin, concernant la **fusion**, des démonstrations sont indispensables pour préparer la communauté de recherche française à l'exploitation scientifique du réacteur expérimental ITER<sup>1</sup> (contrôle du plasma, intégration de systèmes, etc.) et minimiser les risques pour le démonstrateur DEMO<sup>2</sup>.

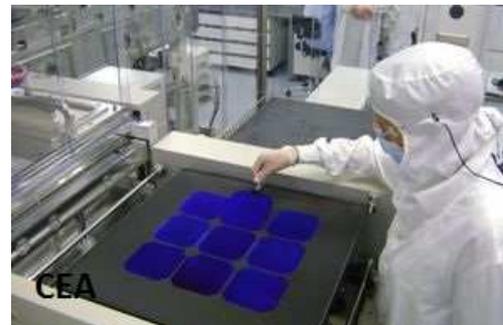
---

## Énergie solaire

*L'énergie solaire occupe une place de choix parmi les énergies renouvelables. Elle est en effet disponible gratuitement, partout et en très grande abondance. Par ailleurs, sa conversion directe en énergie électrique ou thermique offre un rendement bien plus important que l'énergie éolienne, hydraulique ou maritime. Malgré ces atouts, sa part reste relativement modeste en raison du coût de fabrication des systèmes de conversion et de la nature intermittente de cette énergie, qui requiert un stockage et une gestion des flux spécifiques. L'ANCRE a donc mené, pour chacun des volets de l'énergie solaire (photovoltaïque, thermique, thermodynamique), une analyse des efforts de R&D nécessaires pour faciliter leur développement.*

### Les verrous

Des verrous transverses freinent le développement de l'énergie solaire. Il s'agit tout d'abord d'augmenter le rendement, la durabilité et la sécurité des installations, tout en diminuant leur coût de fabrication. Cela passe par une réduction des quantités de matériaux, une limitation des recours aux métaux rares, l'utilisation de matières et de procédés peu toxiques et l'amélioration de la recyclabilité. Par ailleurs, l'intermittence de l'énergie solaire pose la question du stockage de l'électricité et de la chaleur produites, et de leur restitution.



Des recherches ciblées doivent être menées pour lever ces verrous :

- dans le domaine de la production d'électricité photovoltaïque, les efforts portent principalement sur la purification et la cristallisation du silicium, l'augmentation des rendements de conversion, la concentration du rayonnement et les couches minces, en particulier celles basées sur les matériaux semi-conducteurs composés,
- la production de chaleur par conversion thermique, essentiellement utilisée pour des applications à basse température dans le bâtiment (eau chaude, chauffage), doit quant à elle progresser en matière de capteurs, de stockage, de contrôle-commande des installations et d'intégration au bâtiment
- enfin, la filière thermodynamique (conversion de la chaleur générée par le rayonnement solaire en énergie mécanique, puis électrique) est appelée à se développer à condition d'optimiser toutes les étapes de la chaîne de production : système de concentration, récepteur solaire, stockage, appoint et conversion. Elle pourrait également être appliquée à la production de carburants de synthèse.

---

## Énergies marines, hydrauliques et éoliennes

*Le Grenelle de la Mer a fixé aux énergies marines renouvelables un objectif ambitieux : contribuer à hauteur de 6 gigawatts au bilan énergétique national en 2020. Or, seul l'éolien posé, onshore et offshore, a acquis une certaine maturité industrielle, les autres sources d'énergie étant encore peu*

<sup>1</sup> International Thermonuclear Experimental Reactor

<sup>2</sup> Demonstration Power Plant

développées. L'ANCRE a concentré ses réflexions sur les filières nécessitant une R&D en rupture technologique et pour lesquelles la France peut nourrir une ambition industrielle : l'hydrolien, qui utilise les courants marins ou fluviaux, l'éolien offshore flottant, l'énergie thermique des mers, qui exploite la différence de température entre les eaux superficielles et profondes, et enfin l'énergie houlomotrice, issue des vagues.

## Les verrous

Les efforts de R&D doivent permettre sur chacune des filières de ramener les coûts de production en dessous de 100 €/MWh, de façon à être compétitif par rapport aux autres filières énergétiques.

Cet objectif peut être atteint par la levée de verrous technologiques et également par la montée en puissance de la production d'équipements avec des réductions de coûts associés aux effets de série.

Parmi les principaux besoins communs à toutes les filières, il est nécessaire d'améliorer l'évaluation et la prédiction de la ressource, de proposer des outils de modélisation numérique spécifique aux EMR (de la machine aux parcs), d'effectuer des tests sur démonstrateurs en mer pour valider les concepts proposés. Des solutions innovantes de raccordement entre le câble de transport de l'électricité vers le rivage et le poste de conversion haute tension alimenté par les générateurs électriques (parc de machines hydroliennes, houlomotrices, éoliennes) sont également indispensables.

En ce qui concerne l'énergie hydrolienne, des progrès sont nécessaires pour réduire le coût et la durée d'installation des structures de maintien, concevoir des moyens logistiques adaptés à leur mise en place.

L'éolien offshore flottant ne sera compétitif qu'à condition de réduire significativement le prix des flotteurs. Il faut donc imaginer de nouveaux concepts proposant un couple flotteur/aérogénérateur technologiquement optimisé, adapté aux contraintes maritimes et économiquement rentable.

Si l'énergie thermique des mers présente l'avantage d'être disponible en permanence et à un niveau de puissance certain, son essor se heurte à deux verrous majeurs : la performance sur le long terme des échangeurs de chaleur et la conception des conduites assurant le confinement de l'eau de mer froide pompée en profondeur pendant son trajet vers la centrale située en surface.

Enfin, la très grande disparité actuelle des systèmes de récupération de l'énergie houlomotrice requiert des outils et méthodologies appropriés pour les qualifier de façon pertinente.



Source IFPEN

Eolienne marine

---

## Énergies dans les transports

*Un quart de la consommation mondiale d'énergie, presque autant des émissions de CO<sub>2</sub> et une dépendance quasi-exclusive au pétrole : les transports sont l'un des paramètres majeurs de l'équation énergétique mondiale. Les travaux de l'ANCRE ont couvert ce domaine par une approche à la fois sectorielle et transversale. La priorité a été donnée dans un premier temps au transport routier, les autres secteurs faisant déjà l'objet d'études par d'autres structures – le CORAC<sup>3</sup> pour l'aviation, le Grenelle de la Mer pour le transport maritime et fluvial – ou n'ayant pas suffisamment clarifié leurs attentes vis-à-vis de la recherche publique (transport ferroviaire).*

## Les verrous

Dans le domaine du transport routier, l'électrification totale ou partielle des véhicules offre un fort potentiel d'amélioration de la consommation et des émissions mais se heurte à de nombreux verrous :

---

<sup>3</sup> Conseil pour la recherche aéronautique civile

architectures, motorisations hybrides et électriques, optimisation des motorisations thermiques, carburants conventionnels et alternatifs, stockage de l'électricité, stratégies de contrôle et de gestion d'énergie, etc.

En ce qui concerne le transport aérien, les programmes de recherche sont déjà fortement structurés. Les efforts de l'ANCRE se concentrent donc sur les synergies possibles avec ces réflexions ou, à plus long terme, sur des domaines encore peu couverts (nouvelles architectures d'aéronefs) ou pouvant être traités de façon transversale (carburants alternatifs, électrification des systèmes de propulsion et des appareils, etc.). Quant au secteur ferroviaire, s'il est à l'heure actuelle le mode de transport le plus économe, l'utilisation des technologies de l'information et de la communication, ainsi que le développement de composants avancés en électrotechnique de puissance, pourraient en améliorer encore les performances.

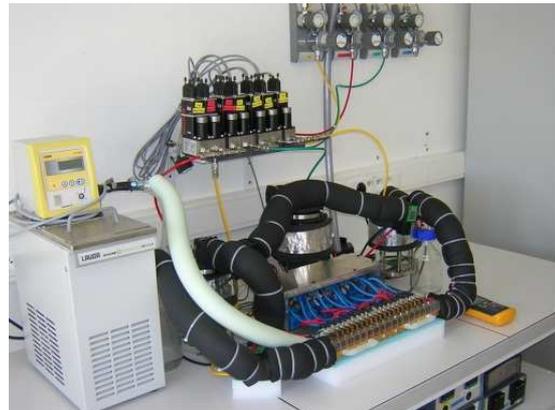


Photo LEMTA-CNRS-Université de Lorraine  
Expérimentation sur pile à combustible instrumentée

Enfin, le transport maritime et fluvial étant momentanément écarté des réflexions de l'ANCRE, deux derniers verrous font l'objet d'une attention particulière car leurs retombées concernent plusieurs modes de transport : l'allègement et l'aérodynamisme des structures d'une part, l'efficacité énergétique des systèmes de transport d'autre part.

## Bâtiment

*Le bâtiment est en France l'activité économique la plus consommatrice d'énergie et représente un quart des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour satisfaire à l'objectif dit Facteur 4<sup>4</sup> du Grenelle de l'Environnement, le secteur de la construction doit donc améliorer de façon radicale ses performances énergétiques, tant à l'échelle du bâtiment que de son environnement urbain. Cet effort nécessite une analyse globale, intégrant à la fois les aspects techniques, environnementaux, économiques et sociologiques. C'est pourquoi, outre certains verrous déjà répertoriés par les programmes de recherche en cours, l'ANCRE a identifié des axes de travail supplémentaires, indispensables à l'approche systémique des enjeux énergétiques du bâtiment.*

## Les verrous



Photo CNRS

Un premier verrou concerne la rénovation de l'enveloppe des bâtiments. Cette dernière joue en effet un rôle primordial dans l'amélioration de l'efficacité énergétique par les multiples fonctions qu'elle assure (isolation, étanchéité, confort thermique, etc.) et qui sont disponibles dans le neuf.

Dans le bâtiment, la consommation d'énergie résulte d'un ensemble d'équipements couvrant des besoins divers (production de chaleur ou de froid, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation, appareils ménagers, etc.). Leur interopérabilité est cruciale pour une maîtrise globale de la consommation énergétique.

L'interopérabilité est également indispensable à la mise en œuvre d'une gestion intelligente de l'énergie aux échelles du bâtiment, de l'urbain et des réseaux, en s'appuyant sur les technologies numériques.

<sup>4</sup> Diviser par quatre les émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050

La maîtrise de l'énergie est, pour une large part, une affaire d'usages et de comportements associés à la vie urbaine (logement, travail, vie sociale, mobilité, etc.). Il faut donc développer une approche centrée sur l'utilisateur et non plus exclusivement sur la technologie.

Enfin, trois verrous complémentaires et incontournables conditionnent la capacité de la filière à changer radicalement : la formation des acteurs ; la mise au point d'outils informatiques permettant aux professionnels de concevoir et de gérer des bâtiments répondant aux nouvelles exigences énergétiques ; l'observation du parc immobilier afin de valider les solutions envisagées.

---

## Industries et agriculture

*L'industrie représente près du quart de la consommation d'énergie française. Si des progrès ont déjà été accomplis pour réduire ce besoin, des gains supplémentaires sont envisageables par un rattrapage technologique et, surtout, par le développement de procédés en rupture. L'agriculture soulève quant à elle des enjeux environnementaux liés à sa dépendance vis-à-vis de l'industrie chimique (intrants). L'ANCRE a donc orienté ses travaux sur l'optimisation énergétique et environnementale de ces secteurs, avec une triple préoccupation : gagner en efficacité énergétique (consommer moins, valoriser plus), réduire les émissions (gaz, liquides, solides, coproduits non valorisables), utiliser plus d'énergies et de matières premières renouvelables.*

### Les verrous

La méthodologie retenue consiste à améliorer l'efficacité énergétique aux différentes échelles du composant (équipement industriel, parcelle, bâtiment d'élevage), du lieu de production (usine, exploitation agricole) et du territoire (zone industrielle, coopérative, commune, etc.). Il s'agit de mieux valoriser les gisements d'énergie et les coproduits, mais aussi d'améliorer la sobriété des procédés en utilisant des énergies décarbonées et en mettant au point de nouveaux procédés et matériaux innovants. Ces recherches devront s'intégrer dans un contexte d'écologie industrielle et agricole (éco-parcs).



Un verrou important réside dans la quantification des consommations. Il s'agit, grâce à une métrologie innovante et adaptée, faisant appel à des capteurs performants, fiables et bon marché, d'effectuer un bilan des flux d'énergie et de matières à chaque échelle. La fusion et le traitement de ces données doivent fournir des indicateurs de gains d'efficacité énergétique des procédés et des modes de production.

Le second verrou majeur consiste à prédire les gains énergétiques potentiels, ce qui nécessite un outil numérique multicritère et multi-échelle capable de tester, avec une capacité prédictive, différents scénarii d'amélioration.

Certains verrous faisant déjà l'objet d'une étude ciblée par un autre groupe (captage et stockage du CO<sub>2</sub>) ou relevant d'une approche transversale (vecteurs énergétiques, motorisations, pompes à chaleur, piles à combustible, etc.) n'ont pas été traités.

---

## Prospective-Formation

*La prospective énergétique globale : une vision prospective socio-technico-économique du système énergétique mondial et de ses composantes est indispensable pour apporter une aide à la décision pour la définition des politiques publiques et l'orientation de la recherche technologique.*

*La formation a également commencé à faire l'objet d'une réflexion au sein de l'ANCRE.*

## Les verrous

**La prospective économique globale** : les modèles existants doivent être interconnectés et améliorés en termes de performance, de qualité des données technico-économiques et de finesse de modélisation des comportements des acteurs économiques et des dynamiques globales des systèmes économiques. L'enjeu est de produire des scénarii articulant des visions à court et long termes, offrant une représentation cohérente des systèmes technologiques et socio-économiques et intégrant les incertitudes. Cela implique également le développement de bases de données technologiques cohérentes, fiables et accessibles à ces modèles afin de prendre en compte le plus efficacement possible l'évolution des technologies dans les scénarios énergétiques.

Par ailleurs la prise en compte des aspects sociétaux et socio-économiques de la transition énergétique –notamment autour de la problématique des réseaux- fait également l'objet de travaux.

**La formation** : l'offre de formations devra être adaptée pour intégrer les nouvelles technologies et les nouveaux métiers liés à la transition énergétique.

---

## Réseaux et Stockage

*Les réseaux et stockage électriques : cette thématique technologique est déterminante pour l'évolution du système électrique. Il s'agit d'intégrer une part croissante d'énergies renouvelables (décentralisées et/ou intermittentes) et de mobilité électrique, tout en équilibrant l'offre et la demande en temps réel. Cette approche pour partie applicable aux autres réseaux énergétiques (réseau de chaleur, réseau de gaz) et inclue la possibilité de transfert d'énergie d'un réseau à l'autre (par exemple « power to gas »)*

## Les verrous



**Les réseaux et stockage électriques** : outre la lourdeur des investissements, plusieurs obstacles freinent leur évolution. L'intégration d'une production délocalisée et/ou intermittente et le développement de la mobilité électrique posent la question de la fiabilité du réseau, de sa sûreté de fonctionnement, du traitement et de la sécurité des données, de la prise en compte de la

délocalisation et de l'ouverture vers de nouveaux modèles économiques et sociaux. Les technologies de stockage de l'énergie se heurtent quant à elles à deux verrous : les performances techniques – et notamment la durée de vie, qui pèse fortement sur les coûts – et la construction de filières nationales qui devront s'appuyer sur des modèles technico-économiques validés à l'échelle du système électrique, voire énergétique.

Les verrous des réseaux de chaleur sont assez semblables avec l'intégration des énergies intermittentes, l'usage optimal des rejets thermiques des sites industriels ou de production électrique, le stockage (journalier, intersaisonnier) et l'adaptation offre/demande en temps réel.

Parmi les solutions qui pourraient s'offrir aux gestionnaires de réseaux énergétiques le transfert d'un vecteur énergétique vers un autre vecteur commence à être sérieusement envisagé, notamment pour répondre aux aléas des énergies renouvelables intermittentes. C'est le cas du concept « power to gas » qui vise à transformer l'électricité ENR en excès en hydrogène, et injecter ce dernier dans le réseau de gaz.