

# 18. Le mix énergétique

## TECHNOLOGIE

L'innovation  
comme solution

## ÉCONOMIE, ENVIRONNEMENT

Regards croisés  
sur le mix énergétique



*Pour diversifier leur économie, les Émirats arabes unis ont fait évoluer leur mix énergétique. Shams (Total, Abengoa Solar et Masdar), l'une des plus grandes centrales solaires à concentration du monde (100 MW) a ainsi vu le jour dans la banlieue d'Abou Dhabi.*

Cahier spécial  
**La Recherche**  
réalisé avec  
le soutien  
de la direction  
scientifique de



CHERCHEURS D'ÉNERGIES

Tous les deux mois, ce cahier *La Recherche* vous permet de comprendre les défis technologiques, économiques et environnementaux des énergies.

# L'innovation comme solution

***Selon l'Agence internationale de l'énergie, la demande mondiale en énergie primaire, tirée notamment par les pays hors OCDE, augmentera d'environ un tiers d'ici à 2035. Et l'innovation, sous toutes ses formes, apparaît comme la clé pour répondre à cette croissance tout en préservant les ressources naturelles et l'environnement.***

**A**u niveau mondial, les sources d'énergie mises à contribution pour répondre aux besoins sont aujourd'hui majoritairement d'origine fossile. Au fil des années et selon les régions, les parts du charbon, du pétrole et du gaz dans le mix énergétique

primaire (voir infographie page 43) varient proportionnellement plus que celles des énergies renouvelables ou du nucléaire. Car la composition et l'évolution du mix dépendent de nombreux facteurs : de la disponibilité des ressources ou des facilités d'importation ; de l'ampleur et de la nature des besoins à couvrir, bien sûr. Mais

aussi du contexte économique, social, environnemental, historique et politique. Aux États-Unis, par exemple, priorité est donnée à la notion d'indépendance énergétique. Pour diminuer ses importations d'hydrocarbures en provenance du Moyen-Orient, le pays exploite notamment ses gisements de gaz non conventionnels. Conséquences : le remplacement massif des centrales à charbon par des centrales à gaz (à l'inverse de ce qui se passe en Europe où le prix du charbon a fortement baissé ces dernières années), moins émettrices de CO<sub>2</sub>, et le développement important des véhicules à gaz. En France, c'est aussi la volonté d'indépendance qui a conduit à la diversification des sources d'approvisionnement en hydrocarbures et au développement, dans les années 1970, de la production d'électricité nucléaire. Aujourd'hui, l'industrie qui s'y rattache (EDF, Areva, GDF Suez) est devenue forte. Difficile, dans ce contexte, de basculer vers d'autres modes de production. Dans le cas de l'Allemagne, au contraire, les inquiétudes suscitées par les accidents de Tchernobyl, d'abord, puis de Fukushima, ont mené, en parallèle au développement de l'industrie des énergies renouvelables (EnR), à une résurgence de l'usage du charbon pour la production d'électricité. À toutes ces considérations s'ajoutent encore celles des industriels du secteur qui opèrent, en fonction des mutations en cours, des choix stratégiques qui leur appartiennent, des choix qui varient, eux aussi, selon les pays concernés.

« Il n'y a pas de choix optimal. La solution sera apportée par un mix. Mais, quoi qu'il en soit, les efforts à faire en matière de R&D et de vitesse de diffusion des nouvelles technologies sont considérables », assure Nathalie Alazard-Toux, directrice Économie Veille à l'IFP Énergies nouvelles. Une vision que partage Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, directeur de l'institut de technico-économie des systèmes énergétiques du CEA. « Sans ruptures technologiques, la France ne pourra pas atteindre ses objectifs de diminution des émissions de CO<sub>2</sub> (facteur 4 pour les gaz à effet de serre à l'horizon 2050). »

## ◆ UN BESOIN IMPÉRIEUX DE SOLUTIONS DE STOCKAGE

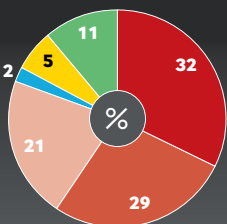
L'Allemagne a fait le choix des énergies renouvelables (EnR) et notamment du solaire et de l'éolien, des sources intermittentes et non programmables. Il apparaît donc comme indispensable pour le pays de déployer des solutions de stockage de l'électricité. Des solutions à air comprimé (compression grâce à un surplus d'électricité et détente en cas de besoin) aux stations de stockage de l'énergie par pompage (même principe avec pompage et turbinage d'eau), en passant par les solutions thermiques (stockage de l'électricité sous forme de chaleur), des technologies existent, mais leurs rendements demandent, pour la plupart, à être améliorés et leurs coûts à être contrôlés. L'équation se complique encore avec les contraintes géographiques. Les projets de construction de lignes à haute tension, permettant le transport d'électricité éolienne du nord du pays vers le sud, par exemple, sont longs à mettre en œuvre (une douzaine d'années) et font face à de fortes oppositions de la population. « Pour sortir de l'impasse, l'Allemagne souhaite développer les interconnexions avec les pays voisins, créant ainsi une dépendance technique entre producteurs. Alors, même si les rendements ne sont pas encore au niveau et que le "business model" doit être précisé, une autre solution pourrait venir du Power to Gas », raconte Arnaud Chaperon, directeur Prospectives Énergies Nouvelles du groupe Total. Car un surplus d'électricité peut être converti en hydrogène ou en méthane. Injecté dans les réseaux de gaz naturel existants, celui-ci est alors stocké et surtout transporté facilement avant d'être retransformé en électricité au besoin. « Cette technologie permet aussi de destiner l'hydrogène à d'autres usages », affirme Jean-Paul Reich, directeur scientifique du groupe GDF Suez, avant de citer en exemple le projet HyGas développé par Audi. L'idée : produire, à partir d'électricité décarbonnée et de CO<sub>2</sub> (méthanisation de biomasse), de l'hydrogène qui viendra alimenter des véhicules roulant au gaz naturel.

## MIX ÉNERGÉTIQUE VERSUS MIX ÉLECTRIQUE

Source Agence internationale de l'énergie

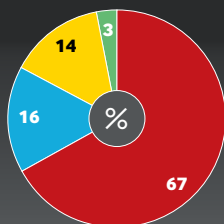
### MIX ÉNERGÉTIQUE

● Pétrole ● Charbon ● Gaz naturel  
● Hydraulique ● Nucléaire  
● Énergies renouvelables

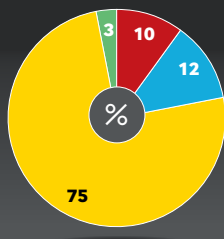
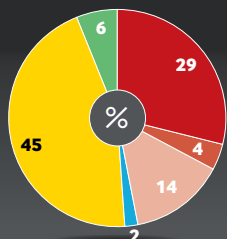


### MIX ÉLECTRIQUE

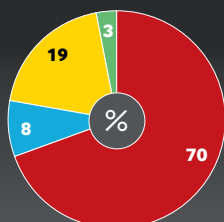
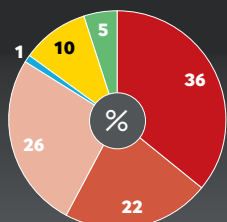
● Thermique (charbon, fioul, etc.)  
● Hydraulique ● Nucléaire  
● Énergies renouvelables



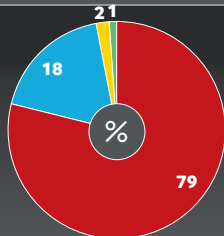
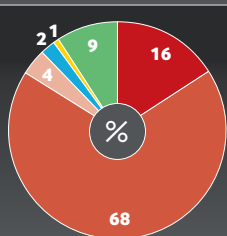
MONDE



FRANCE



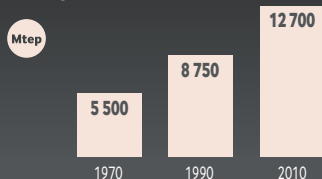
ÉTATS-UNIS



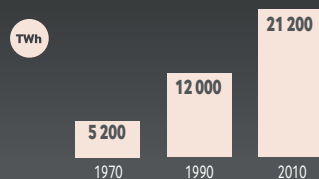
CHINE

### ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE D'ÉNERGIE ET D'ÉLECTRICITÉ DE 1970 À 2010

ÉNERGIE



ÉLECTRICITÉ



Le terme de mix énergétique désigne la répartition des différentes énergies primaires dans la consommation d'une région. Pour que l'analyse soit pertinente, il ne doit pas être confondu avec le mix électrique, qui définit la part du thermique, du nucléaire ou encore de l'hydraulique et des autres renouvelables dans la production d'électricité, et n'intègre donc pas les problématiques liées à l'énergie des transports et de l'industrie. À noter également que dans l'histoire de l'humanité, les sources se sont rarement substituées les unes aux autres mais plutôt additionnées.

#### Gérer l'intermittence

Le mix énergétique primaire devrait ainsi être fortement impacté par des innovations dans les domaines de la production, de l'efficacité énergétique et des changements d'usage. Mais c'est le mix électrique qui focalise, un peu

partout, l'essentiel des débats. Et dans ce cadre, l'un des défis à relever est celui posé par l'intermittence de certaines EnR (solaire et éolien). Il faudra tout d'abord maintenir et améliorer les moyens de production dits de «back-up», ceux qui permettront de fournir

de l'électricité par exemple en l'absence de vent ou de soleil. «Les centrales thermiques chinoises peuvent encore gagner en performances, et l'on pourra aussi réfléchir à des technologies qui permettront de réduire l'impact de tels moyens de production sur l'eau (consommation importante pour l'extraction du charbon, etc.)», précise Kevin Welch, vice-président Stratégie Europe du groupe GDF Suez. L'électricité nucléaire fait aussi, en France notamment, l'objet de nombreux travaux (sécurité, réacteurs de 4<sup>e</sup> génération, fusion, etc.).

Autre point chaud, celui de la stabilité des réseaux. Car l'injection d'une énergie solaire ou éolienne intermittente peut provoquer des pics de tension dommageables pour les transformateurs. «Dans le futur, on pourrait imaginer des transformateurs plus intelligents et capables de gérer, au moins en partie, ces phénomènes nouveaux», indique Arnaud Chaperon, directeur Prospectives Énergies nouvelles du groupe Total. Et, de manière générale, c'est l'ensemble des réseaux qui pourraient devenir plus intelligents (smart grids, gestion de la consommation et de la production à l'échelle locale, etc.). «Mais une rupture de grande ampleur pourrait venir du stockage massif de l'électricité», assure Jean-Guy Devezeaux.

Si certaines technologies, comme celles des stations de transfert d'énergie par pompage, sont matures et assez largement employées, d'autres, comme le stockage d'électricité par air comprimé, demanderont encore beaucoup de travail sur le plan >>>

### 12,7 Gtep d'énergie

primaire, dont plus de 80 % provenant de sources fossiles, ont été consommées dans le monde en 2010, soit plus du double de la consommation de 1973.

### 50 GW

(contre 5 GW aujourd'hui), c'est la capacité de stockage qui serait nécessaire à la France dans le cas d'un scénario centré sur la décarbonisation par l'électrification.

*El Hierro, petite île de l'archipel espagnol des Canaries, a réussi le pari de l'indépendance énergétique. Des millions d'investissements ont été nécessaires pour atteindre cette autosuffisance grâce au vent qui balaie l'île, au soleil qui la réchauffe et à l'eau qui coule dans ses montagnes. Depuis début 2013, une nouvelle centrale hydroéolienne (éoliennes associées à une station hydroélectrique qui, au besoin, stocke l'électricité produite par la force du vent) permet de fournir à elle seule 85 % des besoins en énergie de l'île.*



>>> de la R & D. « Tout cela ne vaudra pas grand-chose si on ne décide pas de rémunérer la flexibilité », souligne Arnaud Chaperon. Une innovation de marché qui pourrait bénéficier aux centrales à gaz, parmi les plus flexibles des moyens de production classiques, et qui, aujourd'hui, se voient parfois contraintes à fermer pour des raisons économiques. Autre challenge de l'innovation dans le secteur : le développement de la cogénération, une rupture qui pourra être mise au service de certains scénarios de mix énergétique. Dans ce cadre, l'exploitation de la biomasse pour la production d'énergie, électricité et autre, demandera de nombreuses innovations. « La maturation des technologies permettra de faire baisser les coûts. Mais, en France, la filière doit surtout être organisée et structurée de manière à minimiser les coûts de la matière première (réduction du rayon de collecte, etc.). Il y a un modèle économique à construire et un cadre réglementaire à mettre en place », précise Nathalie Alazard-Toux.

### Cap sur la sobriété ?

En Europe, depuis 2008, les consommations énergétiques n'ont fait que diminuer. Une conséquence de la crise économique mais aussi d'une efficacité énergétique croissante. Dans un scénario mettant l'accent sur la sobriété, l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie imagine un large bouquet d'innovations, notamment dans le secteur du résidentiel et du tertiaire (pompes à chaleur, isolation, réseaux de chaleur, domotique, etc.). « Il y a aussi des choses à faire sur le plan de la formation des différents corps de métier. Poser un panneau solaire masqué par l'ombre d'un arbre est contre-productif et pourtant, ça arrive encore. Et dans le même ordre d'idée, on peut aussi penser aux innovations dans le secteur de la construction. Au Portugal, des technologies automatisées à partir d'un exosquelette permettent de construire une maison en quinze jours seulement. C'est le cycle de vie du bâtiment dans sa globalité qui doit être pris en compte et revu », propose Jean-Guy Devezeaux. Dans l'industrie également, l'innovation mènera à la sobriété. Selon le

Ceren, l'observatoire statistique de la demande en énergie, les gains en efficacité énergétique (amélioration des procédés, technologies de transfert thermique, éco-parcs, etc.) permettront d'équilibrer la hausse intrinsèque de la consommation d'énergie due à la croissance économique.

Enfin, du côté de la mobilité, le développement de voitures individuelles consommant moins de 2 litres aux 100 kilomètres (voitures plus légères, moteurs améliorés, etc.), mais aussi, bien sûr, l'arrivée sur le marché de véhicules hybrides rechargeables, puis de voitures purement électriques ou encore de véhicules à hydrogène (carburant liquide avec un moteur alimenté par une pile à combustible) permettront de réduire les consommations, étant entendu qu'il faut se préoccuper du bilan global des émissions de CO<sub>2</sub>, et pas seulement de celui du véhicule. « Nous nous apprêtons à vivre quelques dizaines d'années de sélection naturelle sur les nouveaux modèles et de coévolution des voitures classiques. Au final, le choix se fera de lui-même selon des critères de coûts et de flexibilité. Pour l'heure, nous ne sommes qu'au début de cette lente évolution », annonce Arnaud Chaperon.

En attendant, des innovations sociétales sont en marche. « Nous allons vers une nouvelle conception de la mobilité dans laquelle les comportements individuels sont appelés à évoluer et la place de l'autopartage (véhicules en libre-service, covoiturage, etc.), bien plus efficace, à se développer », conclut Jean-Guy Devezeaux. ●

## De la compétitivité des technologies

Selon Kevin Welch, vice-président Stratégie Europe du groupe GDF Suez, « les technologies énergies renouvelables vont encore connaître des baisses de coût, particulièrement le photovoltaïque. Mais l'élément déterminant pour implanter une installation reste la disponibilité de la ressource ». Pour fonctionner à plein rendement, les centrales solaires thermodynamiques qui produisent chaleur et électricité, par exemple, doivent être installées dans les régions les plus ensoleillées (au moins 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an, alors que la moyenne française se situe autour de 1000 kWh/m<sup>2</sup>/an) et les moins sujettes à l'humidité, aux poussières et aux fumées. Des zones généralement situées à moins de 40° de latitude nord ou sud. Dans ces régions, un seul kilomètre carré d'installation pourrait permettre de générer jusqu'à 130 GWh d'électricité par an et assurer la rentabilité du système. « La croissance économique a longtemps fait que la plupart des pays n'exploitaient pas leur potentiel de développement

d'énergies renouvelables. Mais les choses changent », assure Kevin Welch. Certains, comme l'Arabie Saoudite, commencent à réaliser leur utilité. Pour ce pays tout particulièrement, produire de l'électricité solaire en abondance permettrait d'économiser un pétrole qui pourrait alors plus largement être destiné à l'exportation. Dans les pays à forte croissance, la question ne se pose pas non plus dans les mêmes termes que dans les pays occidentaux. Dans nombre d'entre eux en effet, les réseaux de transport et de distribution de l'énergie sont inexistantes. « Le recours au photovoltaïque décentralisé est alors tout à fait rentable puisqu'il permet de s'affranchir de la construction de lourdes infrastructures », explique le vice-président Stratégie Europe du groupe GDF Suez. « En matière de mix énergétique, il est possible que les pays en voie de développement sautent quelques-unes des étapes que l'Europe a franchies au fil des années », conclut Arnaud Chaperon, directeur Prospectives Énergies nouvelles du groupe Total.

# Regards croisés sur le mix énergétique

*Mêlant enjeux industriels, économiques, sociétaux, politiques et environnementaux, le mix énergétique et son évolution font l'objet de nombreux débats à travers le monde. Les membres du comité éditorial des cahiers « Chercheurs d'énergies » donnent aujourd'hui leur point de vue.*

## ◆ Quel regard portez-vous sur le mix énergétique actuel et sur ses possibles évolutions?

**Léon Duvivier :** La transition énergétique est une notion propre à chaque grande zone géographique. Pour l'Europe, on peut regretter que les États n'aient pas décidé de coordonner leurs politiques nationales. Aux États-Unis par exemple, la transition actuelle est centrée sur l'exploitation des gaz et pétrole non conventionnels ; en Allemagne, sur l'arrêt du nucléaire et le développement rapide des énergies renouvelables (EnR) ; et en France, l'accent est plutôt mis sur les économies d'énergie et le développement des énergies alternatives.

**Jean-François Minster :** Le mix énergétique est destiné à satisfaire les besoins de manière qualitative, dans des conditions économiques acceptables et dans une logique d'indépendance, en prenant en compte les enjeux environnementaux. Il évolue constamment pour s'adapter aux contraintes du moment. Aujourd'hui, nous devons faire face à une hausse des prix, à des problématiques environnementales mondiales, à une très forte interdépendance usages-énergies et à une nouvelle donne de la notion d'indépendance énergétique. La question ne se résume pas au passage des énergies fossiles aux EnR.

**Olivier Appert :** Le système énergétique présente une grande inertie. Le mix énergétique n'évoluera donc que lentement. Par ailleurs, il n'y a pas de mix énergétique idéal : il dépend des conditions spécifiques de chaque pays. En France, pays pauvre en ressources énergétiques, il faut miser sur l'efficacité énergé-

tique et sur une diversification des approvisionnements en profitant, en outre, de l'acquis du nucléaire pour la production d'électricité.

**Bernard Tardieu :** C'est d'autant plus vrai que le mix énergétique dépend d'investissements à long terme et que l'arrêt d'outils industriels ou domestiques avant leur fin de vie présente un coût additionnel. Aujourd'hui, notre mix énergétique doit tenir compte des engagements européens (20% d'EnR et réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'un facteur 4). Mais l'expérience allemande ou danoise montre que le développement irréfléchi des EnR intermittentes conduit finalement à une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Les EnR stockables et notamment les bioénergies méritent en revanche de l'attention car elles peuvent servir à la production de carburant, de chaleur ou même d'électricité.

**Bernard Salha :** À l'échelle mondiale, la production électrique est pour deux tiers thermique et émet du CO<sub>2</sub> en quantité, ce qui ne semble pas pouvoir perdurer. En Europe, même si les paysages nationaux sont très différents, 50% de l'électricité produite sont déjà décarbonnés. Et, avec les objectifs affichés, on pourrait s'attendre à ce que les émissions de CO<sub>2</sub> baissent encore. Dans la pratique, même si la part des EnR dans la production d'électricité a effectivement augmenté significativement ces dix dernières années, celle du charbon, fort émetteur de CO<sub>2</sub>, a aussi augmenté et celle du gaz, pourtant particulièrement flexible, a reculé.

**L. D. :** La rentabilité des cycles combinés au gaz a été remise en question par l'arrivée sur le marché

### Léon Duvivier

est le vice-président Technologies du groupe GDF Suez.



### Jean-François Minster

est le directeur Scientifique du groupe Total.



### Olivier Appert

est le président d'IFP Énergies nouvelles et président du Conseil français de l'énergie.



d'un charbon américain à bas prix dans un contexte de prix faible du carbone et de développement rapide des énergies renouvelables subventionnées. C'est ainsi que des cycles combinés récents et à haut rendement sont mis sous cocon partout en Europe.

Si l'Europe ne corrige pas ces dys-fonctionnements et ne met pas en place notamment des mécanismes de rémunération de capacité, elle pourrait passer à côté de la solution du tandem énergies renouvelables et gaz naturel à faible intensité de carbone, qui est la voie la plus rapide et la moins onéreuse pour réduire les émissions, tout en préservant la fiabilité du système électrique. Nous courons dans le cas contraire un risque de black-out. Il est à craindre qu'aucune société de production n'investisse encore dans des actifs onéreux appelés à ne fonctionner que quelques centaines d'heures par an.

**François Moisan :** La place des EnR intermittentes en France est encore très faible et peut s'accroître sans mettre en péril l'équilibre du réseau. Mais, à long terme, c'est l'action sur la demande qui facilitera le

**13%** de l'électricité produite en Europe était renouvelable en 2003.

**25%** de l'électricité produite en Europe était renouvelable en 2012.

**Moins de 1% par an,** c'est le taux de renouvellement du parc immobilier français.

choix du mix le plus pertinent. Elle peut baisser de 18% d'ici à 2030 par une meilleure efficacité énergétique.

#### ◆ Quelles sont les mesures à mettre en place pour atteindre les objectifs européens ?

**B. S. :** Les principaux leviers à actionner sont dans les domaines du transport et du bâtiment. L'innovation permettra de développer des technologies plus performantes (batteries pour la mobilité électrique, revêtements isolants moins envahissants, compteurs communicants, etc.) et économiquement plus pertinentes.

**F. M. :** Le premier secteur sur lequel faire porter l'effort est celui du bâtiment par la réhabilitation du parc existant. Un rythme de 50 000 logements par an a été identifié. Le secteur des transports est également une cible importante grâce aux technologies mais aussi à l'organisation des déplacements.

**B. T. :** La production de chaleur et l'énergie pour les transports devraient aussi concentrer des efforts soutenus car les mutations sociales et industrielles associées à la transition énergétique dans ces domaines seront importantes.

#### ◆ Justement, quelle sera la place des changements d'usages ?

**B. T. :** La transition énergétique peut s'analyser en évaluant les possibilités de remplacer progressivement les combustibles liquides fossiles par des combustibles renouvelables. C'est dans ce domaine que les innovations et les modifications d'usages seront les plus lourdes. Mais les scénarios de mix concernent aussi la société par le prix de l'énergie et par leurs impacts sur les modes de vie lorsqu'ils modifient l'emploi (quantitativement et qualitativement), les transports, etc.

**F. M. :** Concernant la mobilité, de nouveaux usages ont déjà fait leur apparition : véhicules partagés ou en libre-service, covoiturage, etc. Ils permettent de passer d'un taux de remplissage de 1,1 à 2,8. C'est considérable et, avec l'électrification des véhicules, on peut envisager de décarboner totalement les déplacements urbains dans les quarante ans à venir.

**L. D. :** Le concept de véhicule individuel semble ne plus être au centre des préoccupations de la nouvelle génération, et certains constructeurs automobiles commencent à se poser la question d'offres innovantes à mettre sur le marché.

**O. A. :** Mais, dans les transports, 95% de l'énergie vient toujours des produits pétroliers faciles à stocker en grande quantité et offrant une autonomie de 1 000 km en quelques minutes avec un poids limité. La relation du citoyen par rapport à la voiture évolue, mais ça ne changera pas du jour au lendemain. Des politiques urbaines sont mises en œuvre pour limiter la circulation aux motorisations peu émettrices de CO<sub>2</sub> (réduction des nuisances sonores et de la pollution) : cela favorise les changements d'usages. Dans le bâtiment aussi, les comportements sont à revoir. La lutte contre le gaspillage reste d'actualité et peut être très efficace. Malheureusement, les changements d'habitudes ne se décrètent pas. Une baisse de chauffage de 1 °C permet d'économiser 7% d'énergie. Or depuis trente ans, la température dans les bâtiments français n'a cessé d'augmenter.

**J.-F. M. :** On peut toujours pousser à des changements d'usages mais on ne sait jamais à l'avance comment le marché et la société vont les accueillir. À nous de proposer une palette de solutions, et les plus adéquates finiront par se dégager. Mais une chose semble certaine : l'éducation jouera un rôle fondamental.

## ◆ L'EUROPE MANQUE DE COHÉSION

Concernant la question énergétique, la position de l'Europe est ambitieuse et affiche simultanément des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de promotion des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique. « Ces objectifs semblent d'autant plus ambitieux que la politique énergétique de l'Europe reste à construire. Alors que la politique climatique communautaire est régie par Bruxelles, l'énergie reste l'apanage de chaque État membre, et les décisions ne sont pas prises de façon suffisamment concertée », précise Gérard Moutet, directeur Climat Énergie à la direction du Développement durable et de l'Environnement de Total. Pour exemple, le débat autour du nucléaire. Alors que l'Allemagne a décidé de fermer ses centrales, le Royaume-Uni a fait le choix de développer son parc, et la Pologne de se lancer dans l'aventure. Même manque de cohésion concernant les gaz non conventionnels. Alors que la France s'oppose à toute exploration, Pologne, Danemark et Royaume-Uni se montrent plus ouverts. Ces situations très hétéroclites semblent d'autant moins viables que les marchés et les réseaux de transport et de distribution sont de plus en plus interconnectés. Il devient donc urgent de dépasser les clivages nationaux, ne serait-ce que pour éviter de mettre en danger l'ensemble du système. « L'une des conséquences du contexte européen actuel, c'est que la consommation de charbon, dont le prix a baissé avec l'arrivée massive sur le marché américain de gaz non conventionnels, repart à la hausse. C'est un vrai paradoxe car celui-ci est particulièrement néfaste sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub>. Cet exemple montre bien que le débat sur le mix énergétique du futur doit être élargi, et même au-delà des limites de l'Europe. Il doit aussi être dépassionné car les choix qui seront faits auront des répercussions directes sur nos vies quotidiennes », conclut le directeur Climat Énergie de Total.



### Bernard Salha

est le directeur de la Recherche et du Développement du groupe EDF.



### Bernard Tardieu

est le président de la commission Énergie et Changement climatique à l'Académie des technologies.



### François Moisan

est le directeur exécutif de la Stratégie, de la Recherche et de l'International et le directeur scientifique de l'Ademe.

#### ◆ Comment financer la transition énergétique ?

**B. T. :** Les coûts de la transition seront probablement plus élevés que prévu. Les actions nécessaires et coûteuses, comme le développement des réseaux de transport électrique et les moyens de stockage, ou le développement de la production de chaleur renouvelable, n'ont pas beaucoup d'influence sur la satisfaction des objectifs européens. Ceci n'est pas mobilisateur politiquement. C'est pourtant là qu'il faut investir en R & D, en innovation et en développement urbanistique. D'autre part, nous devons prendre le temps de la réflexion et de l'anticipation dans une approche systémique où c'est le service final rendu aux citoyens (y compris à travers l'emploi) qui est analysé avec son coût et son efficacité. Ceci doit se faire en fonction des climats,

des géographies, des habitudes. L'efficacité énergétique ne s'optimise pas de la même manière en montagne, sur la côte ou dans une grande ville.

**J.-F. M. :** Il n'y a pas de solution magique, mais les transitions énergétiques ont toujours trouvé leurs financements (investissements de l'État sur les infrastructures nucléaires ou rentabilité propre). Aujourd'hui, la rentabilité économique de transformations dictées par des enjeux climatiques n'est pas assurée. Il y a tout de même plusieurs pistes à explorer : les économies d'énergie rapides et à moindre frais ; les réglementations et les normes, notamment sur l'ancien. Le recours aux incitations, au financement public et à la solidarité dans le cas de la précarité énergétique. La création de valeur, car on peut espérer que la transformation de l'industrie de l'énergie sera créatrice d'emplois locaux. Mais s'inscrivant dans le long terme, avec la mondialisation de l'économie, rien n'est moins sûr. Enfin, dernière perspective mais pas des moindres, la baisse des coûts.

**L. D. :** Dans les dix ans qui viennent, on s'attend à une forte baisse des coûts du solaire photovoltaïque qui pourrait devenir la technologie de production d'électricité la moins chère du marché. Dans certains pays, l'énergie électrique produite par les panneaux solaires est déjà compétitive par rapport à l'électricité provenant du réseau de distribution. L'arrivée sous peu du photovoltaïque organique intégré au bâti va considérablement changer la donne. Il sera sans doute produit à grande échelle par impression 3D et certainement peu coûteux.

D'une façon plus générale, il y a trois mesures majeures à prendre. Il convient d'abord de promouvoir le développement des énergies renouvelables au meilleur coût en limitant les aides publiques à la R & D pour les technologies d'énergie renouvelable les moins matures. Il faut ensuite, comme je l'ai indiqué précédemment, garantir la rémunération des capacités de production existantes nécessaires à la sécurité d'approvisionnement. Il est essentiel enfin de donner un signal prix du CO<sub>2</sub> significatif pour restaurer le fonctionnement du marché carbone en Europe.

◆ Le compromis entre considérations industrielles, économiques,

sociétales et environnementales semble difficile à trouver...

**O. A. :** Le trilemme énergétique mis en avant par le Conseil mondial de l'énergie exprime le fait que les politiques énergétiques et climatiques doivent parvenir à trouver un équilibre entre trois objectifs souvent perçus comme contradictoires : sécurité énergétique, équité énergétique et développement durable. En Europe, on s'intéresse plus à l'aspect développement durable. Mais en Allemagne, par exemple, le développement massif des EnR se traduit aujourd'hui par une hausse des prix de l'énergie et par des risques sur le système électrique.

**J.-F. M. :** La difficulté aujourd'hui, c'est que chaque pays suit un chemin différent, résultat d'enjeux qui lui sont propres, alors que la question du mix énergétique est mondiale.

**F. M. :** L'Ademe a montré qu'un scénario de transition énergétique atteignant le facteur 4 en 2050 (division par 4 des gaz à effet de serre), avec une réduction de 50% de la demande d'énergie et une croissance relative des énergies renouvelables, permettait d'accroître la croissance économique et l'emploi par rapport à un scénario tendanciel. Il est donc possible de conjuguer ces différents objectifs.

**B. T. :** Trouver un compromis, c'est le rôle du politique. Les objectifs européens ont été lancés dans une période de relative euphorie économique alors que l'épuisement des ressources fossiles paraissait proche. Aujourd'hui, l'enjeu central pourrait devenir l'élargissement des soucis climatiques au reste du monde. Car l'exemplarité voulue par l'Europe ne doit pas handicaper ses positions industrielles dans le monde. ◆

PROPOS RECUEILLIS PAR NATHALIE MAYER

Ce cahier spécial **La Recherche** a été réalisé avec le soutien de la direction scientifique de **TOTAL**

#### Comité éditorial :

Jean-François Minster, Total - Olivier Appert, IFP Énergies nouvelles - François Moisan, Ademe - Bernard Salha, EDF - Bernard Tardieu, Académie des technologies - Marc Florette, GDF SUEZ -

#### Rédaction :

Nathalie Mayer

#### Conception graphique et réalisation :

A noir,

**Crédits photographiques :** SHAMS /Total, Benjamin Bechet/PictureBank, GDF SUEZ, Philippe Zamora/Total, IFP Énergies nouvelles, EDF, Académie des technologies, Ademe

Retrouvez ce cahier spécial en français et en anglais sur le site

**planete-energies.com**  
une initiative de **TOTAL**

**800 g de CO<sub>2</sub>**  
sont émis pour chaque kWh d'électricité produite à partir de charbon.

**400 g de CO<sub>2</sub>**  
sont émis pour chaque kWh d'électricité produite à partir de gaz.