

Analyse prospective des solutions technologiques au défi climatique

Par Olivier APPERT

Président du Conseil français de l'Énergie

Les défis en matière d'énergie et d'environnement sont étroitement liés. La technologie est un des leviers à mobiliser pour leur apporter des solutions. Mais il faut se rappeler que les temps de l'énergie et de la technologie sont des temps longs. Aussi la transition vers un système énergétique durable prendra-t-elle des décennies. De nombreuses technologies sont envisageables, mais il n'y a pas de panacée qui permettrait de résoudre tous les problèmes.

« Le monde va bientôt manquer de sa plus importante ressource énergétique parce que les réserves commencent à être épuisées. Pour faire face à ce désastre, il est indispensable de se tourner vers l'énergie éolienne ». Cette citation ne date pas de 2015, mais de 1881. Elle émane de Lord Kelvin, un des plus grands scientifiques. Cette citation doit nous amener à faire preuve de modestie et de pragmatisme dans nos exercices de prospective !

Le temps de l'énergie

Aujourd'hui, les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) représentent près de 80 % de l'approvisionnement énergétique mondial. Cette dépendance ne va pas diminuer rapidement, car le secteur énergétique présente une grande inertie. Ainsi, le taux de renouvellement du secteur résidentiel et tertiaire est d'environ 100 ans. La durée de vie moyenne des centrales électrique est, quant à elle, de l'ordre de 50 ans...

Par ailleurs, la demande d'énergie est étroitement corrélée au PIB mondial qui augmente avec l'accroissement de la population et avec celui du niveau de vie, en particulier dans les pays émergents. Cette corrélation s'est maintenue depuis 50 ans, et ce malgré les bouleversements économiques et politiques qui sont intervenus : chocs pétroliers de 1973 et 1979, contre-choc pétrolier de 1986, chute du Mur de Berlin en 1990 et crise économique de 2008. Un enjeu majeur de la politique énergétique et environnementale est d'infléchir cette courbe afin de préserver la croissance économique, indispensable partout dans le monde et plus encore dans les pays en voie de développement (PVD). En l'absence d'un remède miracle, il nous faut adopter une approche pragmatique. L'efficacité énergétique est un moyen puissant, mais ce n'est qu'un moyen parmi d'autres. Elle passe par des modifications dans le comportement des consommateurs, mais aussi par le renouvellement d'équipements ayant une longue durée de vie.

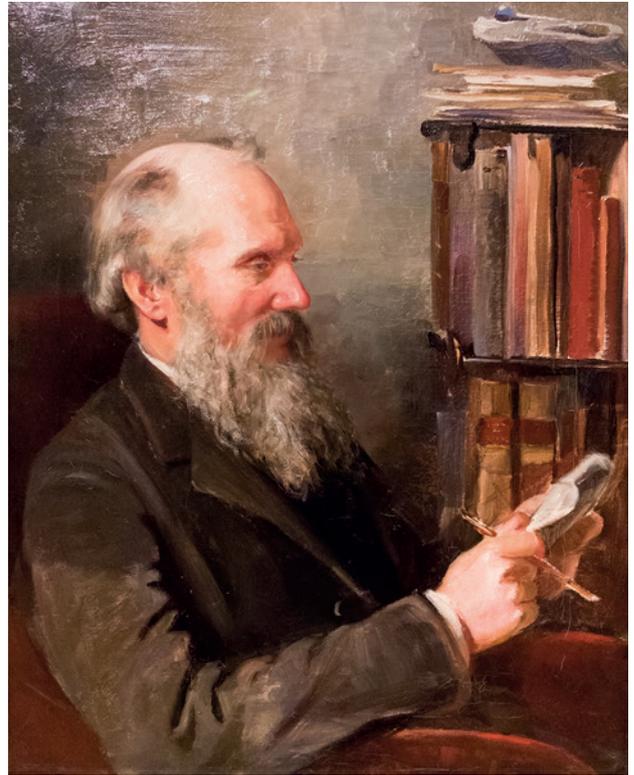


Photo © Stefano Baldini-BRIDGEMAN IMAGES

Portrait (réalisé en 1886) du mathématicien, physicien et ingénieur, Lord Kelvin (1824-1907) - Toile d'Elizabeth Thomson (1848-1914), National Portrait Gallery, Londres.

« "Le monde va bientôt manquer de sa plus importante ressource énergétique parce que les réserves commencent à être épuisées. Pour faire face à ce désastre, il est indispensable de se tourner vers l'énergie éolienne". Cette citation ne date pas de 2015, mais de 1881. Elle émane de Lord Kelvin, un des plus grands scientifiques. »



Le temps de l'énergie est un temps long

Bouquet énergétique mondial de 1965 à 2010

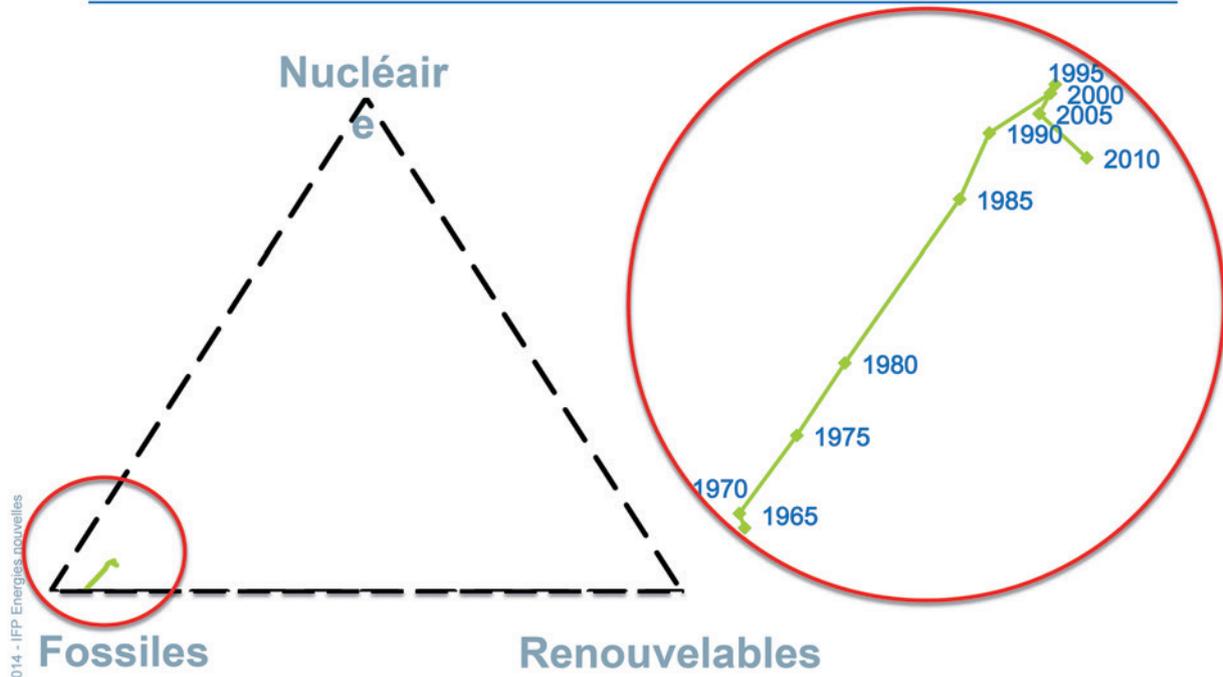
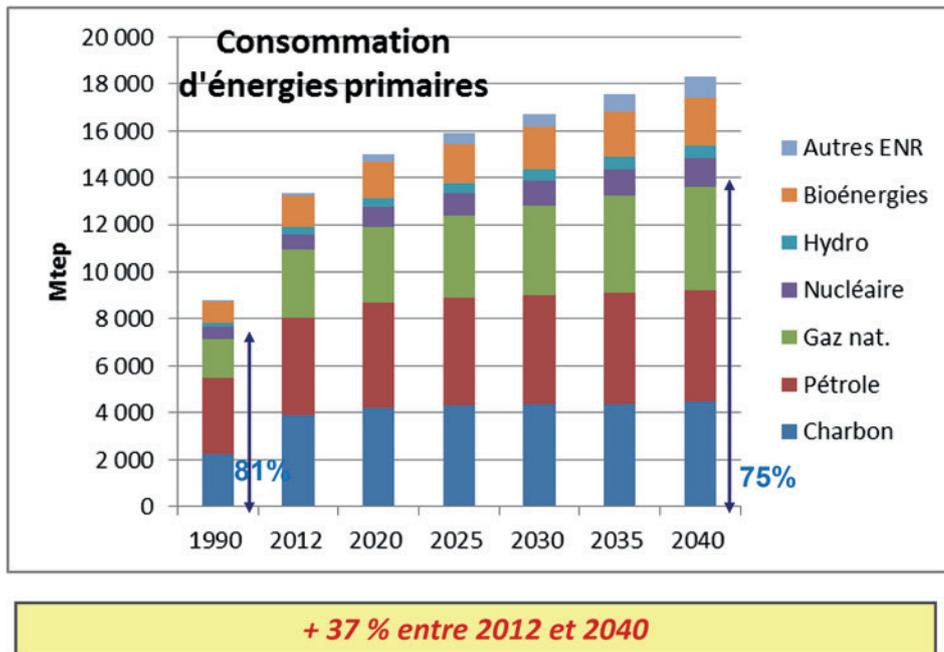


Figure 1



Demande d'énergie primaire (Mtep)



© 2014 - IFP Energies nouvelles

Source : AIE WEO 2014, Scénario "Nouvelles politiques"

Figure 2

La Figure 1 (de la page précédente) illustre l'inertie de l'évolution du mix énergétique. Décarboner le bouquet énergétique revient à déplacer le curseur du sommet « fossiles » vers les sommets « renouvelable » et « nucléaire ». On constate qu'en 50 ans, peu de chemin a été parcouru, alors que, dans le même temps, la consommation d'énergie a triplé. De plus, depuis 1990, la décarbonation de l'économie semble en panne.

Les récentes publications de l'Agence Internationale de l'Énergie, qui font autorité en la matière, illustrent ces fondamentaux du secteur.

Dans un scénario moyen, la consommation d'énergie mondiale devrait augmenter de 37 % entre 2012 et 2040, les énergies fossiles couvrant les trois-quarts de la hausse de la demande. Ainsi, malgré les politiques mises en œuvre dans tous les pays, la part des énergies fossiles dans le mix énergétique serait de 75 % en 2040, à comparer à 81 % en 1990. Satisfaire la croissance de la demande énergétique impliquera en outre des investissements considérables : plus de 1 000 milliards de dollars par an, soit environ 1,4 % du PIB mondial. De plus, il faut se rappeler qu'un milliard d'habitants de notre planète n'ont toujours pas accès à l'électricité.

Panorama des technologies bas carbone

La transition énergétique passera par le déploiement de technologies innovantes. Il est donc nécessaire de prendre

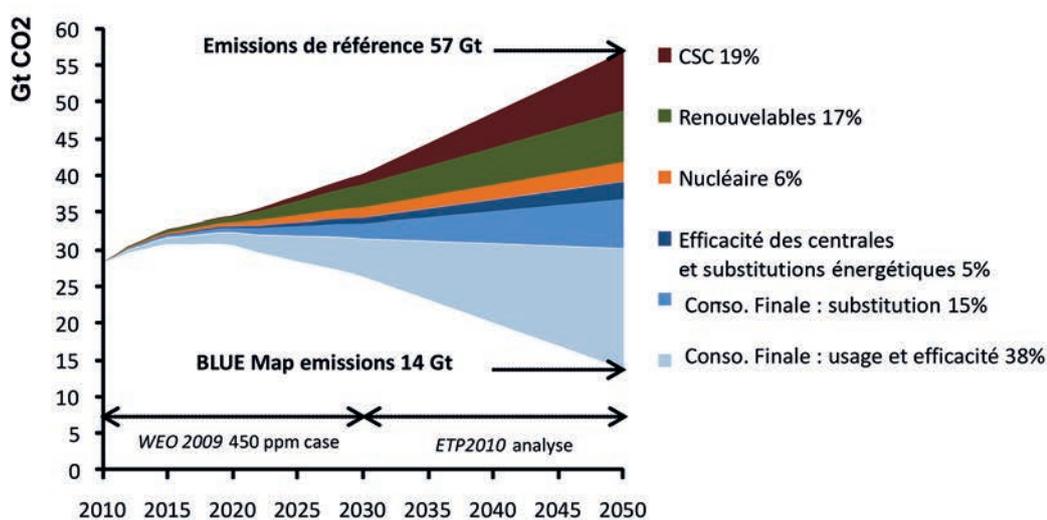
conscience de la contribution des diverses technologies.

La Figure 3 (ci-dessous) tirée de l'étude de l'AIE *Energy Technology Perspectives 2010* illustre le potentiel des différentes technologies disponibles pour répondre à ce défi qu'est la réduction d'un facteur 2 des émissions mondiales de GES à l'échéance 2050. L'efficacité énergétique devrait couvrir à elle seule plus du tiers de l'écart entre le niveau des émissions de GES résultant d'un prolongement des tendances actuelles, et celui nécessaire pour limiter la hausse de la température de la planète à 2°C maximum, à l'échéance du milieu de la prochaine décennie. La conversion vers des énergies moins carbonées (par exemple, la substitution du gaz au charbon) permettrait de réduire les émissions de 18 %. Le nucléaire couvrirait 6 % de l'écart. Les renouvelables contribueraient à hauteur de 21 % (à noter que la moitié de cette contribution proviendrait de la biomasse). Enfin, l'AIE estime que le captage et le stockage du CO₂ (CCS), avec un potentiel de réduction estimé à 19 %, est indispensable pour pouvoir respecter les objectifs précités de réduction des émissions de CO₂. On notera que dans cette projection ambitieuse, les énergies fossiles représenteraient toujours près de 50 % du mix énergétique mondial en fin de période.

La Commission européenne a développé une autre approche des technologies bas carbone dans son rapport *Strategic Energy Technology Plan* (SET Plan) publié en 2008.



Une révolution énergétique nouvelle : réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie



Un large éventail de technologies sera nécessaire pour réduire significativement les émissions de CO₂ liées à l'énergie

Source : AIE ETP 2010

Figure 3



Photo © Bernd Settnik-MAXPPP

Le site de captage et de stockage de CO₂ de la société Vattenfall à Schwarze Pumpe (Brandebourg, Allemagne, décembre 2011).

« L'AIE estime que le captage et le stockage du CO₂ (CCS), avec un potentiel de réduction estimé à 19 %, est indispensable pour pouvoir respecter les objectifs précités de réduction des émissions de CO₂. On notera que dans cette projection ambitieuse, les énergies fossiles représenteraient toujours près de 50 % du mix énergétique mondial en fin de période. »

Toutes les technologies ne sont pas au même niveau de maturité (axe horizontal de la Figure 4 de la page suivante). Par ailleurs, le déploiement de ces technologies se heurte à des difficultés plus ou moins grandes (axe vertical de la même Figure). Certaines technologies sont d'ores et déjà disponibles, et peuvent donc être déployées dès maintenant ; d'autres en sont encore au stade de la R&D. Par ailleurs, certaines technologies peuvent être déployées sans que cela pose de problèmes majeurs (par exemple, l'isolation des bâtiments) ; d'autres, en revanche, se heurtent à des obstacles significatifs (par exemple, la construction de nouvelles centrales nucléaires). Dans la Figure 4, la superficie des cercles représente le potentiel de chacune des technologies envisageables.

Il faut se rendre à l'évidence : il n'existe pas aujourd'hui de panacée qui permettrait de résoudre tous les problèmes. Il convient de déployer immédiatement les technologies d'ores et déjà disponibles (phase 1) et de poursuivre les investissements de R&D pour développer les technologies de phase 2.

On peut noter que ce rapport rédigé en 2008 ne souligne pas cet enjeu technologique majeur que représente le stockage de l'énergie, particulièrement pour l'électricité. Or, compte tenu de l'explosion récente du solaire et de l'éolien, ce thème est aujourd'hui considéré comme une priorité

majeure. Par ailleurs, cette analyse ne prend pas en considération l'enjeu de l'adaptation au changement climatique.

Focus sur quelques technologies clés

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous allons faire un point sur quelques-unes des technologies clés existantes.

Les énergies renouvelables

Pour de nombreux responsables politiques les énergies renouvelables représentent une technologie centrale de la transition énergétique. La croissance considérable de ces énergies est un exemple de décisions politiques prise sans considération des implications économiques.

Les investissements dans les secteurs du solaire et de l'éolien ont augmenté d'un facteur 6 de 2004 à 2011. Le caractère intermittent de ces productions crée de graves distorsions de la courbe de charge, et leur faible coût marginal exerce une forte pression à la baisse sur les prix de marché de l'électricité. C'est en particulier le cas en Europe, où les utilités sont confrontées à une dégradation significative de leur situation financière. La forte croissance de ces énergies a été favorisée par une réglementation qui leur était très favorable (obligation d'achat à prix garanti) et par l'octroi de subventions : en Allemagne, ces subventions récurrentes atteignent 25 milliards d'euros par an. Ainsi, de façon pa-

Les opportunités industrielles des technologies bas carbone

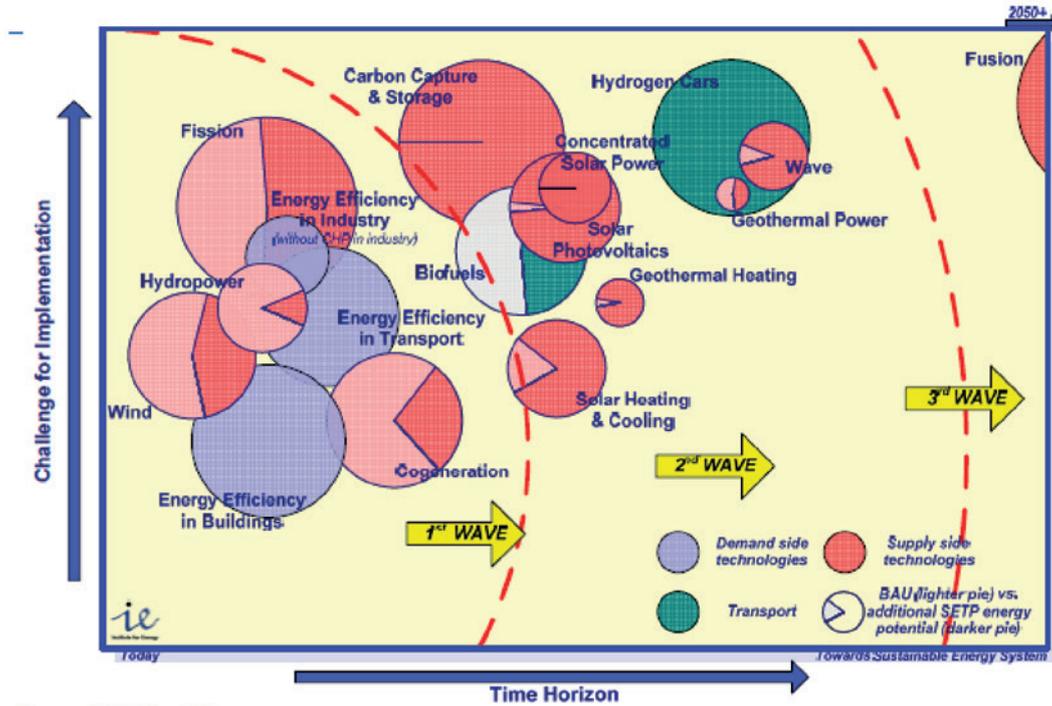
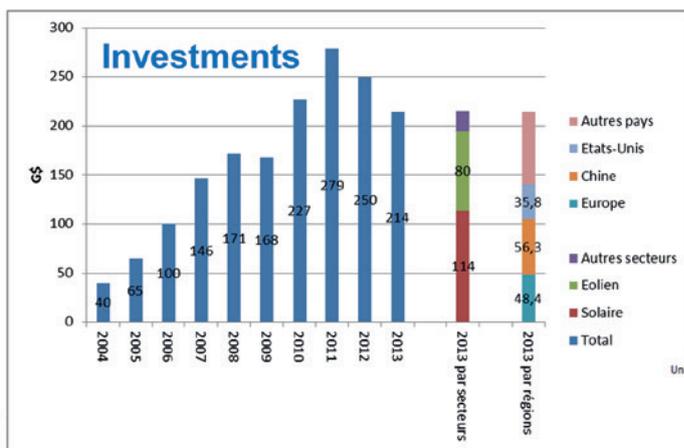


Figure 4

Renewables: a dramatic growth



Increasing budget constraints

Ex. Germany: 22 G\$ in 2013 ...

France : 4 G\$ in 2013

Subsidies 2013

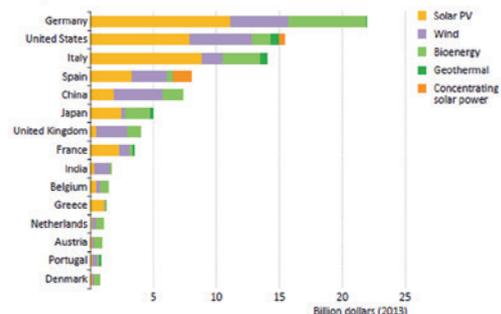
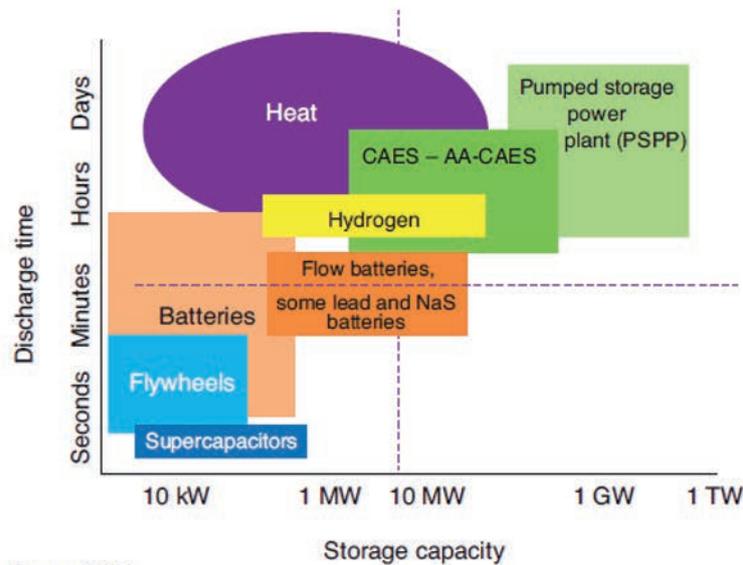


Figure 5



Electricity storage: a key challenge

Storage technology as defined by capacity and discharge time (autonomy)



© 2014 - IFP Energies nouvelles

Source: IFPEN

Figure 6

radoxale, alors que le prix de marché baisse, le prix facturé au consommateur final augmente. La crise économique de 2008 et ses incidences budgétaires ont conduit nombre de pays à remettre en cause ce dispositif favorable : conséquence immédiate, les investissements ont baissé par rapport à leur niveau maximum de 2011.

La nécessaire maîtrise de l'équilibre du réseau exige la réalisation d'importants investissements dans les infrastructures de transport et de distribution de l'électricité, mais le déploiement de nouvelles lignes se heurte à de nombreuses oppositions au niveau local. Il est dès lors d'autant plus nécessaire de développer les technologies de stockage d'électricité (voir *infra*). Il faut aussi reconsidérer la structure des réseaux en développant ce que l'on appelle les *smart grids*.

Quand on parle d'énergies renouvelables, on omet très souvent l'hydroélectricité et la biomasse, alors que leur contribution au mix énergétique est pourtant sans commune mesure avec celles du solaire et de l'éolien. L'hydroélectricité et la biomasse sont des technologies matures et disponibles, qui peuvent être déployées dès aujourd'hui. Les possibilités qu'elles offrent sont trop souvent sous estimées.

Le stockage d'électricité

Le stockage de l'énergie, en particulier de l'électricité, apparaît indispensable si l'on veut compenser le caractère intermittent des énergies renouvelables. Les technologies

de stockage peuvent prendre de multiples formes suivant la puissance considérée (10 kW à 1 TW), la durée de stockage (quelques heures ou quelques mois) ou encore le temps de charge et de décharge.

On distingue quatre types de technologies de stockage de masse de l'électricité.

a) le stockage mécanique. Les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) constituent la technique de stockage la plus largement développée, mais le nombre des sites potentiellement aménageables est limité. On peut aussi envisager le stockage sous forme d'air comprimé ou par volant d'inertie, mais ces technologies ne sont pas encore matures.

b) le stockage électrochimique ou électrostatique. La technologie des batteries est connue depuis plus de deux siècles : on se positionne donc loin sur la courbe d'expérience, mais les progrès potentiels sont limités. Des développements sont également possibles dans le domaine des super capacités et des supraconducteurs.

c) le stockage thermique ou thermochimique. L'énergie est alors stockée sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente. D'autres voies sont explorées comme les systèmes par absorption ou le recours à des matériaux à changement de phase.

d) enfin, le stockage chimique sous forme d'hydrogène ou de méthane de synthèse.

Mis à part les STEP, les technologies qui viennent d'être mentionnées en sont encore au stade de la R&D pour ce qui concerne leur utilisation sur les réseaux électriques. On ne peut raisonnablement envisager leur déploiement à grande échelle avant une à deux décennies.

Le captage et le stockage du CO₂ (CCS)

Le CCS consiste à capter le CO₂ là où il est concentré (par exemple, dans les fumées des centrales thermiques ou dans celles des industries grosses consommatrices d'énergie), puis à le transporter avant de le stocker dans des formations géologiques profondes. Les technologies mises en œuvre sont d'une utilisation classique dans l'industrie pétrolière : traitement des gaz, transport de gaz acides, stockage de gaz naturel. Ainsi, depuis 1996, 1 million de tonnes de CO₂ est stocké chaque année dans un aquifère profond, sur le gisement de Sleipner en mer du Nord. Les technologies mises en œuvre doivent cependant être adaptées pour en réduire le coût. Au début des années 2000, nombreux ont été les industriels à investir massivement dans ce type de projet. Par des efforts de R&D, l'objectif était de réduire le coût d'un facteur 2. En 2005, le *business model* était considéré comme crédible, car les coûts qu'il était espéré d'obtenir en 2025 grâce à ces efforts étaient du même ordre de grandeur que le prix attendu du CO₂, soit environ 50 dollars la tonne ; il faut rappeler qu'à l'époque, le prix du CO₂ sur le marché de l'ETS se situait aux alentours de 25 euros la tonne. Malheureusement

les investissements de R&D n'ont pas été à la hauteur des anticipations. En outre, le prix du CO₂, au lieu de croître, s'est effondré en dessous de 6 euros la tonne.

Cela étant, le CCS est toujours considéré par les experts comme une technologie incontournable. L'évolution du contexte économique retarde la perspective de son déploiement à grande échelle, mais elle reste toujours d'actualité dans deux secteurs clés de l'exploitation des hydrocarbures : celui de l'*Enhanced Oil Recovery* (EOR) et celui de la production de gaz acides.

Depuis de nombreuses années, l'injection de CO₂ dans les gisements est utilisée pour améliorer le taux de récupération du pétrole (EOR). Aux États-Unis, ce sont plus de 50 millions de tonnes de CO₂ qui sont ainsi injectées chaque année.

Par ailleurs, de plus en plus de gisements gaziers présentent des teneurs élevées en gaz acides. Ceux-ci (parmi lesquels figure le CO₂) doivent être séparés du méthane pur. Le coût de la capture du CO₂ est intégré dans le coût total d'exploitation du gisement, si bien que le coût du CCS est marginal : ainsi, le surcoût du stockage du CO₂ dans le gisement d'In Salah en Algérie n'est que de 6 dollars la tonne.

En Europe, l'intérêt pour le CCS a bien diminué, mais cette technologie fait toujours l'objet de développements aussi bien aux États-Unis qu'en Chine. À noter que la

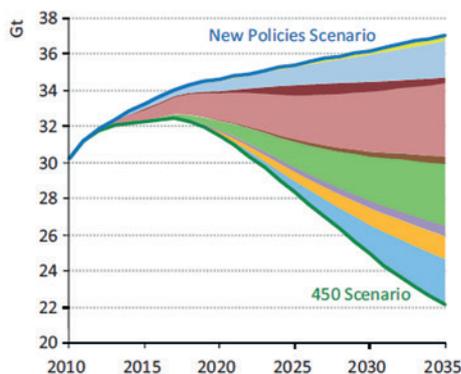


CO₂ management



Internal for gas sweetening IFPACC™

© 2014 - IFP Energies nouvelles



CO ₂ abatement	2020	2035
Activity	2%	2%
End-use efficiency	18%	13%
Power plant efficiency	3%	2%
Electricity savings	50%	27%
Fuel and technology switching in end-uses	2%	3%
Renewables	15%	23%
Biofuels	2%	4%
Nuclear	5%	8%
CCS	4%	17%
Total (Gt CO₂)	3.1	15.0

(source IEA WEO 2012)

40% of conventional gas reserves contain sour gases including CO₂

Field-scale design & deployment

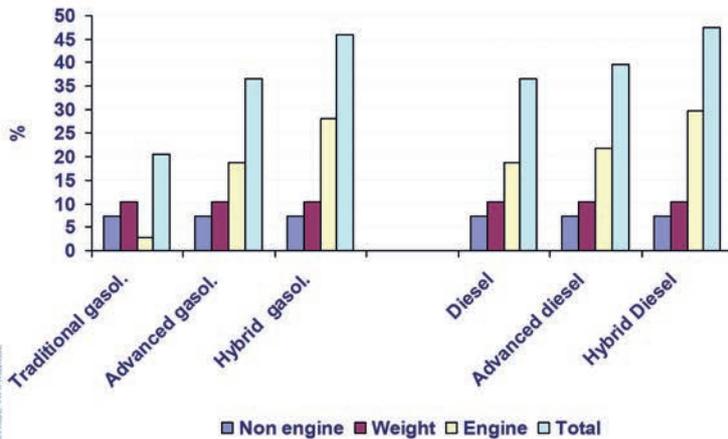


From gas sweetening to CO₂ EOR/EGR

Figure 6



Potential fuels economy improvements



© 2014 - IFP Energies nouvelles

**20 to 50 %
reduction feasible
based on
non engine
(aerodynamics, rolling
resistance, energy
management, weight
reduction)
and
engine
improvements**

Figure 8

Grande-Bretagne vient de décider de lancer un projet de CCS en Écosse. Dans ce but, un cadre réglementaire a été mis en place pour conforter la rentabilité du projet (instauration d'une taxe CO₂ et d'une garantie de prix).

Certains opposent le captage du CO₂ à sa valorisation après transformation en produit chimique, voire en méthane. Mais il faut rappeler que la molécule de CO₂ est très stable, et sa transformation exige d'importantes quantités d'énergie. Le bilan énergétique et économique d'une telle opération est donc sujet à caution. Par ailleurs, les débouchés pour les produits chimiques obtenus (à l'exception du méthane) sont très marginaux par rapport aux volumes potentiels que représente le CCS.

Le secteur des transports

Le secteur des transports représente à lui seul plus de la moitié de la consommation de pétrole mondiale. Par ailleurs, ce secteur dépend à 95 % des produits pétroliers pour son approvisionnement en énergie.

Depuis plus d'un siècle, le moteur à combustion interne occupe une place déterminante dans ce secteur. Bien que cette technologie soit très mature, il subsiste aujourd'hui encore des possibilités d'améliorer son efficacité énergétique : injection directe, turbo, nouveaux modes de combustion... Les progrès considérables réalisés dans le domaine des TIC permettent de réduire la taille des moteurs (et donc leur consommation d'énergie). La motorisation hybride présente, quant à elle, un intérêt majeur. De

même, la réduction du poids des véhicules a un impact direct sur la consommation. La Figure 8 (ci-dessus) donne une illustration de l'énorme potentiel d'économie d'énergie dans ce secteur.

La décarbonation du transport passe aussi par la diversification des sources d'énergie. Les biocarburants de première et deuxième génération sont les premiers substitués aux produits pétroliers, tant dans le transport terrestre que dans le transport aérien. La place du gaz naturel devrait croître dans le transport terrestre de personnes et de marchandises, ainsi que dans le transport maritime. Le véhicule électrique se développera lui aussi, mais il ne devrait constituer à court terme qu'un marché de niche, du fait des limites actuelles des batteries.

En conclusion la demande d'énergie apparaît étroitement corrélée avec la croissance de la population et celle du PIB. Aujourd'hui, les énergies fossiles représentent près de 80 % du mix énergétique. Les évolutions des équilibres énergétiques sont lentes en raison de l'inertie qui caractérise le secteur de l'énergie. La transition énergétique prendra des décennies. Si l'efficacité énergétique est un *must*, il est également indispensable de développer et de déployer tout un ensemble de nouvelles technologies qui apporteront une contribution importante aux efforts engagés pour relever le défi climatique. Mais là comme ailleurs, il n'existe pas de panacée. Le développement et la mise en œuvre de ces technologies nécessiteront d'importants efforts d'innovation.