



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

PERSPECTIVES DES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

2
0
0
6

Au service du Plan d'action du G8

SYNTHÈSE ET
IMPLICATIONS
STRATÉGIQUES

Scénarios et
stratégies à
l'horizon
2050

PERSPECTIVES DES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

2
0
0
6

Scénarios et stratégies à l'horizon 2050

Dans quelle mesure les technologies peuvent-elles contribuer à assurer un approvisionnement énergétique suffisant, à des prix abordables, et réduire les émissions de CO₂ ? Quelles sont les technologies énergétiques les plus prometteuses ? Dans quel délai peut-on espérer parvenir à ce résultat ?

A leur sommet de 2005 tenu à Gleneagles, les chefs d'Etat et de gouvernement du G-8 se sont attaqués à ces questions et ont décidé d'agir d'urgence et avec détermination. Ils ont fait appel à l'Agence internationale de l'énergie afin qu'elle formule des avis sur des scénarios et des stratégies conduisant à un avenir fondé sur des énergies propres et sûres. Les *Perspectives des technologies de l'énergie* entendent répondre à la demande du G8.

Cette étude originale démontre comment les technologies de l'énergie peuvent modifier le cours des choses en s'appuyant sur plusieurs scénarios mondiaux à l'horizon 2050. Elle examine en détail la situation et les perspectives des principales technologies énergétiques dans la production d'électricité, les bâtiments, l'industrie et les transports. Elle analyse les moyens par lesquels le monde peut renforcer la sécurité énergétique et freiner la croissance des émissions de CO₂ en recourant à un portefeuille de technologies actuelles et émergentes. Les principales composantes stratégiques d'un portefeuille promis au succès sont l'efficacité énergétique, la captation et le stockage du CO₂, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire.

Certes, les technologies laissent bien augurer de l'avenir, mais nous devons agir *dès maintenant* si nous voulons libérer le potentiel des technologies actuelles et émergentes, et atténuer les effets de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles sur la sécurité énergétique et l'environnement. Ces *Perspectives des technologies de l'énergie* livrent des éléments de réflexion rigoureux sur les technologies et les politiques pour aider les décideurs publics à imaginer des solutions durables.

© OECD/IEA, 2006

No reproduction, copy, transmission or translation of this publication may be made without written permission.

Applications should be sent to:

International Energy Agency (IEA),
Head of Publications Service,
9 rue de la Fédération,
75739 Paris Cedex 15, France.

■ **SYNTHESE ET IMPLICATIONS STRATEGIQUES**

Cet ouvrage fait suite au Sommet de Gleneagles des chefs d'Etat et de gouvernement du Groupe des Huit (G8) réuni en juillet 2005, et à la réunion des ministres de l'Énergie des pays de l'Agence internationale de l'énergie, qui s'était tenue deux mois auparavant. Les uns comme les autres ont appelé l'AIE à élaborer des scénarios et des stratégies alternatifs qui ouvriront la voie à un avenir fondé sur des énergies propres, intelligentes et compétitives, ainsi qu'à formuler des avis les concernant.

Des approvisionnements énergétiques sûrs, fiables et à des prix abordables sont essentiels pour la stabilité économique et le développement. La menace d'un changement climatique provoquant de graves perturbations, l'érosion de la sécurité énergétique et les besoins énergétiques croissants du monde en développement sont autant de défis considérables à relever pour les décideurs dans le domaine de l'énergie. Seules l'innovation, l'adoption de nouvelles technologies efficaces par rapport aux coûts et une utilisation plus rationnelle des technologies à haut rendement énergétique existantes permettront d'y faire face. Cette publication, intitulée Perspectives des technologies de l'énergie, expose la situation et les perspectives des principales technologies énergétiques, puis évalue les possibilités qu'elles offrent de modifier le cours des choses d'ici à 2050. Elle décrit également les obstacles à la mise en oeuvre de ces technologies et les mesures propres à les surmonter.

Les perspectives à l'horizon 2050 et le rôle des technologies de l'énergie

.....

Le monde ne s'oriente pas vers un avenir énergétique durable. Les prix du pétrole, qui ont atteint des niveaux sans précédent, font craindre pour l'équilibre à long terme de l'offre et de la demande. Les émissions de CO₂ ont augmenté de plus de 20 % au cours de la décennie écoulée. De fait, si l'avenir est à l'image des tendances actuelles dont le scénario de référence de la publication intitulée *World Energy Outlook 2005* donne un aperçu, les émissions de CO₂ et la demande de pétrole continueront de croître rapidement dans les 25 prochaines années, même compte tenu des gains d'efficacité énergétique et des progrès technologiques que laissent espérer les politiques actuelles. Si l'on prolonge ces perspectives au-delà de 2030, ces tendances préoccupantes semblent devoir s'aggraver. Selon le scénario de référence construit pour la présente étude, les émissions de CO₂ représenteront presque deux fois et demie leur niveau actuel en 2050. L'envolée de la demande de transport continuera à peser lourdement sur l'approvisionnement pétrolier. Par ailleurs, l'intensité en carbone de l'économie mondiale augmentera en raison de l'utilisation accrue de charbon pour produire de l'électricité – surtout dans les pays en développement en vif essor qui disposent de ressources charbonnières nationales – et des carburants liquides pour les transports.

Cela étant, l'inflexion de ces perspectives alarmantes est possible. Les scénarios d'accélération technologique (ACT) – qui constituent la charpente de cet ouvrage – mettent en évidence la possibilité de replacer le monde sur une trajectoire énergétique beaucoup plus durable en utilisant des technologies existantes ou en cours de développement. Ces scénarios montrent comment ramener les émissions de CO₂ liées à l'énergie à leurs niveaux actuels en 2050 et freiner la croissance de la demande de pétrole. Ils font ressortir également que la demande d'électricité peut être réduite d'un tiers par rapport au niveau de référence, à l'horizon 2050, grâce à des mesures d'efficacité énergétique. Des économies de combustibles liquides égales à plus de la moitié de la consommation mondiale actuelle de pétrole compenseraient environ 56 % de la croissance de la demande pétrolière prévue dans le scénario de référence.

Les scénarios ACT prévoient de profonds changements qui reposent sur :

- D'importants gains d'efficacité énergétique dans les transports, l'industrie et les bâtiments.
- Une décarbonisation très sensible de la production d'électricité, au fur et à mesure que progresseront les parts du nucléaire, des énergies renouvelables, du gaz naturel et du charbon associé à la captation et au stockage du CO₂ (CSC) dans la composition du parc électrique.
- Une hausse de la consommation de biocarburants dans le transport routier.

Toutefois, même dans les scénarios ACT, les combustibles fossiles restent la principale source d'énergie utilisée dans le monde en 2050. Qu'il s'agisse du pétrole, du charbon (sauf dans un scénario) ou du gaz naturel, la demande en 2050 est plus élevée qu'à l'heure actuelle. Il demeure par conséquent essentiel d'investir dans les sources d'énergie classiques.

Les cinq scénarios ACT tablent sur une progression rapide de la demande de services énergétiques, surtout dans les pays en développement.

Ces scénarios ne postulent pas une limitation de la demande de services énergétiques dans les pays en développement ou développés : ils montrent plutôt comment on peut y répondre plus intelligemment, en rejetant moins d'émissions de CO₂, par la mise en œuvre d'une large éventail de politiques, notamment des initiatives de recherche, développement et démonstration (RD&D) et des programmes de déploiement technologique, ainsi que des incitations économiques à adopter plus rapidement les technologies à faible émission de carbone. Les politiques envisagées sont les mêmes dans les cinq scénarios ACT. Ce qui varie, ce sont les hypothèses sur le rythme d'amélioration de l'efficacité énergétique et de réduction des coûts des principales technologies CSC, énergies renouvelables et nucléaire, par exemple, ainsi que sur les échéances auxquelles ces technologies pourront être largement diffusées. Un sixième scénario, baptisé TECH Plus, met en lumière les résultats obtenus avec des hypothèses plus optimistes sur les progrès des technologies des énergies renouvelables et de l'électronucléaire, ainsi que des biocarburants avancés et des piles à combustible à l'hydrogène dans le secteur des transports.

Les coûts prévus dans les scénarios ACT pour assurer un avenir énergétique plus durable ne sont pas disproportionnés, mais les efforts et l'investissement que devront déployer les secteurs public et

privé seront considérables. Aucune des technologies nécessaires ne devrait – une fois au stade industriel – entraîner une majoration de coûts supérieure à 25 USD par tonne d'émissions évitées de CO₂ dans tous les pays, y compris les pays en développement. A titre comparatif, ce montant est inférieur au prix moyen, sur les quatre premiers mois de 2006, des permis d'émission de CO₂ dans le système européen d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre. Un prix de 25 USD par tonne de CO₂ entraînerait un surcoût de quelque 0.02 USD par kWh pour l'électricité produite à partir de charbon et d'environ 0.07 USD/litre (0.28 USD/gallon) pour l'essence. Si l'on tient compte de l'ensemble du portefeuille de technologies, le coût moyen par tonne de réduction des émissions de CO₂, quand toutes les technologies seront bien implantées sur le marché, sera inférieur à 25 USD. Il s'y ajoutera néanmoins des coûts de transition considérables, liés à la RD&D et aux programmes de déploiement à mettre en œuvre dans les deux prochaines décennies pour amener au stade industriel un grand nombre de technologies. Le prix d'importation du pétrole baissera puisque, la demande étant moindre, les sources d'approvisionnement plus onéreuses seront moins sollicitées. Il se peut pourtant que cette réduction des coûts ne soit pas perceptible, pour le consommateur final, car elle égalera presque les dépenses à engager pour faire avancer les technologies à faible émission de carbone.

Un regard sur les 50 années à venir laisse présager de grandes incertitudes. Les scénarios ACT fournissent, à titre d'exemples, une série de résultats possibles à partir d'hypothèses plus ou moins optimistes sur les réductions des coûts des technologies utilisées dans la production d'électricité, notamment celles des énergies renouvelables, la technologie nucléaire et la CSC. Malgré toutes les incertitudes, il ressort de l'analyse **deux conclusions principales** qui paraissent solides. La première est qu'il existe bel et bien des technologies susceptibles de modifier le cours des choses dans les 10 à 50 prochaines années. La deuxième conclusion est qu'aucune technologie ne peut, à elle seule, jouer un rôle assez déterminant. En misant sur un portefeuille de technologies, on réduit largement les risques, et peut-être aussi les coûts qui y seraient associés, de voir l'une ou plusieurs des technologies envisagées ne pas progresser comme prévu.

L'aperçu ci-après décrit les principales technologies recensées dans les scénarios ACT pour constituer un portefeuille propice à un avenir énergétique durable.

Efficacité énergétique dans les bâtiments, l'industrie et les transports

Il est indispensable d'accélérer l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les économies d'énergie ont récemment marqué le pas dans les pays de l'OCDE, et cette tendance doit s'inverser. C'est tout à fait possible, vu la grande marge qui subsiste pour adopter des technologies plus performantes dans les bâtiments, l'industrie et les transports. Dans les pays non membres de l'OCDE, le potentiel d'amélioration est encore plus important, dans la mesure où la vive expansion de certaines économies ouvre d'immenses possibilités d'investissement dans des technologies à bon rendement énergétique.

Dans nombre de pays, on pourrait accroître de plus de 70 % le rendement énergétique des nouveaux **bâtiments**, par rapport à celui des bâtiments existants. La plupart des nouvelles technologies très prometteuses qui peuvent contribuer à cette transformation se sont d'ores et déjà imposées sur le marché. Il existe par exemple aujourd'hui des fenêtres au pouvoir d'isolation trois fois plus élevé que celui des modèles antérieurs, des chaudières modernes au gaz ou au fioul atteignant un rendement de 95 % et des climatiseurs performants qui consomment de 30 % à 40 % moins d'énergie que les modèles d'il y a dix ans. Par ailleurs, tant le chauffage urbain que les pompes à chaleur et l'énergie solaire permettent d'économiser de l'énergie. Les dispositifs avancés d'éclairage autorisent, quant à eux, des économies d'énergie comprises entre 30 % et 60 % avec un bon rapport coût-efficacité. De même, les réfrigérateurs, les chauffe-eau, les lave-linge et les lave-vaisselle ont beaucoup évolué. En revanche, la consommation d'électricité en mode veille représente environ 10 % de l'électricité consommée par le secteur résidentiel dans les pays de l'AIE, mais les technologies existent pour la réduire très sensiblement. Enfin, certaines technologies nouvelles, notamment les compteurs intelligents, les unités de microcogénération, les piles à combustible et le solaire photovoltaïque, ouvrent des pistes inédites pour la fourniture de services énergétiques.

Dans l'**industrie**, il existe un énorme potentiel de réduction de la demande d'énergie et des émissions de CO₂ à la faveur de l'amélioration du rendement des moteurs, pompes, chaudières et systèmes de chauffe ; de la récupération accrue d'énergie dans les procédés de production ; du développement du recyclage ; de l'adoption de nouveaux procédés, matériaux et matériels plus évolués ; ainsi que grâce à une utilisation plus rationnelle des matériaux et des équipements. Les sources qui rejettent le plus d'émissions industrielles de CO₂ sont la sidérurgie (26 %) ; l'élaboration d'autres minéraux tels que ciment, verre et céramique (25 %), ainsi que la chimie et la pétrochimie (18 %). On peut citer, parmi les technologies industrielles d'avant-garde à fort potentiel d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO₂, les techniques avancées de séparation membranaire qui peuvent se substituer à la distillation dans certains procédés pétrochimiques ; la coulée directe dans la sidérurgie ; ou l'utilisation de matières premières biologiques dans l'industrie pétrochimique pour remplacer le pétrole et le gaz naturel.

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les **transports** revêt une importance primordiale, car ce secteur consomme la majeure partie des produits pétroliers et affiche la plus forte tendance à la hausse des émissions. Or, des améliorations notables du rendement énergétique des véhicules diesel ou à essence classiques sont réalisables. Il existe aussi des technologies prometteuses, notamment les véhicules hybrides et les motorisations diesel avancées. Par ailleurs, les turbocompresseurs, l'injection de carburant et les méthodes avancées de gestion électronique du moteur peuvent réduire la consommation de carburant. L'emploi de nouveaux matériaux et de moteurs plus compacts permet d'alléger les véhicules, qui consomment alors moins de carburant. Les différents dispositifs embarqués, la climatisation surtout, offrent aussi de grandes possibilités de gains de rendement. Enfin, certaines mesures concrètes, par exemple le gonflage correct des pneus, peuvent avoir une influence singulièrement importante sur la consommation.

L'amélioration de l'efficacité énergétique est une priorité absolue dans la démarche vers un avenir énergétique plus durable. D'après les scénarios

ACT, elle aboutit en 2050, dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports, à une réduction de la consommation d'énergie comprise entre 17 % et 33 % par rapport au scénario de référence. Selon le scénario considéré, de 45 % à 53 % de la réduction totale des émissions de CO₂ sont imputables à l'efficacité énergétique en 2050, en regard du niveau de référence. Dans un scénario où les gains d'efficacité ne représentent, au total, que 20 % en 2050 par rapport au scénario de référence, les émissions mondiales de CO₂ dépassent de 20 % celles des autres scénarios ACT.

Technologies du charbon propre et de captation et stockage du CO₂

La technologie de captation et de stockage du CO₂ (CSC) peut faire nettement diminuer les émissions de CO₂ liées à la production d'électricité, à l'activité industrielle et à l'élaboration de carburants de synthèse. Elle permettrait aussi de réduire presque à néant les émissions de CO₂ résultant de l'utilisation de charbon et de gaz naturel dans ces secteurs. Le coût de la CSC est élevé, mais il pourrait être ramené à moins de 25 USD par tonne de CO₂ d'ici à 2030. Si le CO₂ capté peut être utilisé dans des opérations de récupération assistée de pétrole (dite EOR), ce coût sera moindre, voire négatif dans certains cas. Toutefois, à long terme et à l'échelle mondiale, le potentiel imputable à l'injection de CO₂ pour la récupération assistée est faible en regard des émissions totales du secteur de l'électricité.

La démonstration des différents éléments nécessaires à la CSC est d'ores et déjà faite, mais il est urgent de construire une installation intégrée de démonstration en vraie grandeur. Il importe, en particulier, que les centrales à charbon soient très rentables quand la CSC y est couplée, afin de limiter le surcoût lié à l'utilisation de cette technologie. Des technologies de combustion du charbon plus performantes sont d'ores et déjà disponibles, ou se trouvent à un stade avancé de développement, notamment les centrales supercritiques à charbon pulvérisé et la gazéification du charbon intégrée à un cycle combiné (IGCC).

Dans les scénarios ACT, la technologie CSC permet des réductions comprises entre 20 % et 28 % des émissions totales de CO₂ par rapport au scénario de référence à l'horizon 2050. Les technologies du charbon propre associées à la CSC offrent une possibilité, particulièrement importante, de limiter les émissions dans les économies en expansion rapide dotées d'abondantes réserves charbonnières, telles la Chine et l'Inde. La CSC est indispensable pour que le charbon puisse jouer son rôle de combustible qui permet de produire de l'électricité à bas coût dans un monde où la limitation des émissions de CO₂ s'impose. On en a pour exemple un scénario dans lequel la CSC ne fait pas partie des solutions envisageables : la demande mondiale de charbon est alors inférieure de presque 30 % à celle des scénarios qui tiennent compte de la CSC, et l'augmentation des émissions de CO₂ se situe entre 10 % et 14 %.

Production d'électricité à partir de gaz naturel

La part du gaz naturel dans la production d'électricité se maintient assez fermement en 2050 entre 23 % et 28 % de la production totale dans tous les scénarios ACT : la production d'électricité à partir de gaz fait ainsi plus que

doubler par rapport au niveau de 2003. Il existe de vastes réserves de gaz pour faire face à la demande, mais les quantités effectivement disponibles et leur prix dépendront de nombreux facteurs. Comparé au charbon, le gaz naturel produit environ moitié moins d'émissions de CO₂ par kWh. L'amélioration du rendement des centrales au gaz est l'une des réussites technologiques exemplaires contemporaines dans la production d'électricité : les rendements des centrales à cycle combiné au gaz les plus récentes avoisinent 60 %. Une utilisation plus généralisée de cette technologie réduirait donc de beaucoup les émissions. Pour qu'elles affichent des rendements encore plus élevés, il faudra utiliser de nouveaux matériaux résistant à de très hautes températures.

Production d'électricité d'origine nucléaire

L'énergie nucléaire ne produit pas d'émissions, et la technologie a évolué au fil de plusieurs « générations ». La troisième, mise au point dans les années 90, était porteuse de diverses avancées concernant la sûreté nucléaire, par exemple les systèmes à « sûreté passive », et d'un meilleur bilan économique. Onze pays, dont ceux de l'OCDE qui possèdent les plus grands parcs nucléaires, ont uni leurs efforts pour concevoir les réacteurs de quatrième génération. La poursuite de l'exploitation de l'énergie nucléaire se heurte actuellement à trois obstacles de taille : l'importance considérable des coûts d'investissement ; l'opposition du public, motivée par le problème des déchets radioactifs et le risque d'accidents nucléaires, qu'il perçoit comme des menaces ; ainsi que la prolifération possible des armes nucléaires. La conception des réacteurs de quatrième génération entend apporter des réponses à ces préoccupations.

A supposer que des solutions soient trouvées pour surmonter ces obstacles, l'utilisation accrue de l'énergie nucléaire peut entraîner des réductions notables des émissions de CO₂. Dans les scénarios ACT, le nucléaire représente de 16 % à 19 % de la production mondiale d'électricité en 2050. L'accroissement de son usage par rapport au scénario de référence se solde par une réduction des émissions comprise entre 6 % et 10 % en 2050. Dans un scénario plus pessimiste pour le nucléaire, la part lui revenant dans la production d'électricité tombe à 6.7 %, c'est-à-dire la même que dans le scénario de référence. En revanche, dans le scénario plus optimiste dénommé TECH Plus, l'énergie nucléaire contribue à hauteur de 22.2 % à la production d'électricité en 2050.

Production d'électricité à partir d'énergies renouvelables

A l'horizon 2050, la production accrue d'électricité à partir d'énergies renouvelables – notamment l'hydraulique, l'éolien, le solaire et la biomasse se traduit, dans les scénarios ACT, par des réductions des émissions de CO₂ allant de 9 % à 16 %. La part des énergies renouvelables dans le parc électrique passe de 18 % aujourd'hui, à non moins de 34 % en 2050. Dans un scénario où les hypothèses sur la réduction des coûts des technologies des énergies renouvelables sont moins optimistes, la part de ces sources dans la production d'électricité est de 23 % en 2050. Par contre, dans le scénario TECH Plus, plus optimiste pour les technologies des énergies renouvelables et du nucléaire, la part des énergies renouvelables dépasse 35 % en 2050.

L'**hydroélectricité** est d'ores et déjà très largement utilisée, et c'est la source la moins onéreuse pour produire de l'électricité dans de nombreuses régions du monde. Son potentiel de développement est considérable, en particulier celui des microcentrales hydrauliques. L'énergie hydraulique se maintient, dans tous les scénarios ACT, au premier rang des sources renouvelables d'électricité.

Les coûts de l'**éolien terrestre et marin** ont fortement diminué ces dernières années à la faveur d'un déploiement à grande échelle, et de l'utilisation de plus grandes pales et de dispositifs de commande plus complexes. Les coûts sont aussi fonction du lieu d'installation. Les sites terrestres les plus propices, où l'électricité produite peut coûter quelque 0.04 USD par kWh, sont déjà compétitifs vis-à-vis des autres sources d'électricité. En revanche, les installations en mer sont plus coûteuses, surtout en eau profonde, mais elles devraient devenir rentables, selon les prévisions, après 2030. Dans les cas où l'énergie éolienne assurera une part très élevée de la production électrique, il faudra y coupler des réseaux complexes, ainsi que des systèmes d'appoint ou des moyens de stockage, pour faire face à son intermittence. Dans les scénarios ACT, la production d'électricité au moyen d'aérogénérateurs est appelée à croître rapidement. Dans la plupart des scénarios, en effet, l'éolien se place au deuxième rang des sources renouvelables, après l'énergie hydraulique.

La technologie de combustion de la **biomasse** pour produire de l'énergie électrique a d'ores et déjà fait ses preuves. En termes de rentabilité, c'est une option attrayante lorsque du combustible de qualité est disponible à un prix abordable. La cocombustion d'une faible proportion de biomasse dans les centrales à charbon ne nécessite guère de modifications importantes de l'installation, elle peut s'avérer très rentable et contribuer en outre à la réduction des émissions de CO₂.

Les coûts d'exploitation des ressources géothermales à haute température pour produire de l'électricité ont beaucoup baissé depuis les années 70. Le potentiel de la géothermie est immense, mais il s'agit d'une ressource locale, accessible dans certaines régions du monde seulement pour produire de l'électricité. En revanche, l'utilisation de ressources géothermales à plus basse température dans des applications directes comme le chauffage urbain et les pompes à chaleur puisant la chaleur dans le sol est plus largement répandue. La RD&D permettra de réduire encore les coûts et d'élargir les perspectives de l'énergie géothermique.

La technologie photovoltaïque (PV) fait une percée rapide dans des applications de niche. En outre, une plus large diffusion et la poursuite des activités de RD&D ont fait diminuer son coût. Les technologies solaires à concentration (CSP) sont riches de promesses également. Néanmoins, en 2050, la part du solaire (PV et CSP) dans la production mondiale d'électricité sera encore inférieure à 2 % dans tous les scénarios ACT.

Biocarburants et piles à combustible à l'hydrogène dans le transport routier

Trouver des énergies de substitution non carbonées pour le secteur des transports s'est révélé beaucoup plus ardu que pour la production d'électricité. L'éthanol produit à partir de matières végétales est un carburant intéressant

qui présente de bonnes propriétés de combustion. Le plus souvent, il a été mélangé à de l'essence (10 % d'éthanol et 90 % d'essence), mais le Brésil a réussi à utiliser des mélanges bien plus légers en n'apportant aux véhicules que de faibles modifications. Ce pays produit des quantités considérables d'éthanol dérivé de la canne à sucre qui, aux prix actuels du pétrole, est tout à fait compétitif vis-à-vis de l'essence. Pour élaborer de l'éthanol, on se sert principalement aujourd'hui d'amidon ou de sucre, ce qui limite les matières premières disponibles, mais il existe une nouvelle technologie qui permettrait d'en produire à partir de biomasse lignocellulosique : c'est actuellement l'un des domaines à la pointe des recherches sur les technologies de l'énergie.

L'utilisation, dans les véhicules à pile à combustible, d'hydrogène provenant de sources faiblement ou non carbonées pourrait pratiquement décarboniser le secteur des transports à long terme. Le passage à l'hydrogène exigera cependant d'énormes investissements d'infrastructure. De plus, en dépit des progrès spectaculaires récemment accomplis dans le domaine des piles à combustible à l'hydrogène, c'est une technologie encore très onéreuse.

Dans tous les scénarios ACT, environ 6 % de la réduction des émissions de CO₂ sont la conséquence d'une consommation accrue de biocarburants dans les transports, tandis que la contribution de l'hydrogène à cet égard est très faible. Toutefois, dans le scénario TECH Plus, la consommation annuelle d'hydrogène dépasse 300 Mtep en 2050 et permet d'éviter quelque 800 Mt d'émissions de CO₂, auxquels s'ajoutent 700 Mt résultant de l'impact des piles à combustible sur la consommation spécifique de carburant. Dans ce scénario, l'hydrogène et les biocarburants couvrent 35 % de la demande totale finale d'énergie pour les transports en 2050, soit largement plus que les quelque 13 % prévus dans les scénarios ACT et que les 3 % du scénario de référence, ce qui ramène pratiquement à son volume actuel la demande primaire de pétrole en 2050.

Après 2050

.....

Le retour en 2050 aux niveaux actuels des émissions de CO₂, comme dans les scénarios ACT, est une voie possible vers la stabilisation, à terme, des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Mais il faudrait que la tendance des émissions de CO₂, en baisse jusqu'en 2050, se poursuive dans la seconde moitié du XXI^{ème} siècle pour parvenir à stabiliser ces concentrations. Les scénarios ACT font ressortir, de façon approximative, comment affaiblir sensiblement l'intensité en carbone du secteur de la production d'électricité d'ici à 2050. Quant à la décarbonisation des transports, tâche plus difficile, elle devrait être menée à bien dans les décennies suivantes.

Les hypothèses technologiques plus ambitieuses du scénario TECH Plus donnent lieu, à l'horizon 2050, à une réduction de 16 % des émissions de CO₂ par rapport à leur niveau actuel. Bien que ce résultat soit réalisable, il serait hasardeux de compter sur un rythme de progrès technique encore plus rapide que celui postulé dans ce scénario. On pourrait aussi considérer que le scénario TECH Plus donne une idée des tendances à promouvoir avec plus de vigueur, et peut-être plus de certitude, dans la seconde moitié du siècle.

Concrétiser les scénarios ACT : implications stratégiques

.....

Pour atteindre les résultats qu'impliquent les scénarios ACT, l'effort à déployer de façon coordonnée au niveau international est immense. Le soutien des secteurs public et privé sera essentiel. Une coopération sans précédent devra s'établir entre les pays développés et en développement, ainsi qu'entre l'industrie et les pouvoirs publics. La tâche est urgente. Il est impératif de la mener à bien avant qu'un « verrouillage technologique » n'impose une nouvelle génération d'infrastructures énergétiques peu performantes et à forte intensité de carbone. Il faudra y consacrer des décennies et des investissements considérables. Cela étant, il y a d'importants avantages à en tirer, qui ne se cantonneront pas à l'environnement. La baisse de la consommation d'énergie, qui s'accompagne de réductions de la pollution atmosphérique et des émissions de CO₂, peut atténuer les contraintes que pourraient sinon faire peser sur la croissance économique les préoccupations concernant l'approvisionnement énergétique et la dégradation de l'environnement.

Pour que les scénarios ACT se concrétisent, des changements radicaux doivent intervenir dans la production de l'électricité, dans la construction et l'utilisation des logements, des bureaux et des usines, ainsi que dans les technologies des transports. C'est en fin de compte au secteur privé qu'il reviendra de les matérialiser, mais le marché à lui seul ne parviendra pas toujours à obtenir les résultats voulus. D'où la mission fondamentale des pouvoirs publics : soutenir la R&D innovatrice et œuvrer pour que les nouvelles technologies puissent vaincre certains obstacles majeurs. Les pouvoirs publics, l'industrie et les consommateurs auront une lourde tâche à affronter ensemble.

L'efficacité énergétique, une priorité absolue

L'amélioration de l'efficacité énergétique est souvent le moyen le moins coûteux, le plus rapide et le plus respectueux de l'environnement de faire face aux besoins énergétiques mondiaux. Elle rend par ailleurs moins nécessaire l'investissement dans la production d'énergie. De nombreuses mesures d'efficacité énergétique sont d'ores et déjà rentables et, qui plus est, elles seront amorties sur la durée de vie utile de l'investissement grâce à la réduction concomitante des dépenses en énergie. Mais on achoppe encore sur des écueils importants. Les consommateurs sont souvent mal informés et rares sont ceux qui s'intéressent au rendement énergétique quand ils achètent des appareils ménagers, des logements ou des voitures. Même dans la gestion des entreprises, on accorde généralement une faible priorité à l'efficacité énergétique dans la prise de décisions. En outre, certaines possibilités d'économies d'énergie restent ignorées des consommateurs parce que les fabricants de réfrigérateurs, de téléviseurs ou de voitures ne tirent pas tout le parti possible des technologies existantes pour améliorer le rendement énergétique de leurs produits. Un large éventail d'instruments s'offre aux pouvoirs publics pour surmonter ces difficultés : les campagnes d'information du public, les recommandations non contraignantes, l'étiquetage et la fixation d'objectifs, le rôle exemplaire du secteur public dans la passation de marchés, les réglementations contraignantes, les normes, ainsi que les incitations fiscales et financières, notamment.

Les gouvernements devraient s'attacher à aider les entreprises et les consommateurs à adopter et à exiger les technologies avancées qui leur procureront des services de qualité égale, voire meilleure, à moindre coût.

Des programmes bien ciblés de R&D sont essentiels

La nécessité de stabiliser, puis d'augmenter les budgets de R&D énergétique en recul est impérieuse. Il est crucial que le secteur privé intensifie ses activités de R&D. Certaines entreprises ouvertes sur l'avenir le font déjà, mais cette tendance doit se poursuivre et se généraliser. Quant aux technologies déjà implantées sur le marché, le secteur privé est le mieux placé pour faire évoluer les travaux de recherche et développement en cours en fonction des besoins du marché.

Néanmoins, la R&D financée par le secteur public restera essentielle, surtout pour les technologies prometteuses qui n'en sont pas encore au stade industriel. Les budgets publics de R&D des pays de l'AIE sont très inférieurs aux niveaux atteints pour réagir aux chocs pétroliers des années 70 ; or, ils n'ont guère varié, et ont parfois même diminué, au cours de la décennie écoulée. Pour que les résultats des scénarios ACT se réalisent, il faut reconsidérer les budgets de R&D et les programmes de déploiement technologique dans le domaine de l'énergie. Parmi les domaines qui présentent les plus grandes potentialités figurent les biocarburants avancés, l'hydrogène et les piles à combustible, le stockage de l'énergie et les énergies renouvelables de pointe. Certaines disciplines des sciences fondamentales – en particulier les biotechnologies, les nanotechnologies et les matériaux – sont intéressantes également et pourraient avoir, à long terme, des retombées de vaste portée dans le domaine de l'énergie.

De la R&D au déploiement des technologies : une transition cruciale

La phase de déploiement des technologies peut réclamer des ressources beaucoup plus considérables que celle de la R&D. La diffusion massive de plusieurs technologies nouvelles déjà introduites sur le marché ne peut se passer du soutien des pouvoirs publics – c'est le cas notamment de beaucoup de technologies des énergies renouvelables – pour survivre à la période très difficile qui mène à la commercialisation effective. L'expérience montre que les technologies nouvelles voient leurs coûts diminuer au cours de la phase d'« apprentissage technologique », au fur et à mesure que leur diffusion prend de l'ampleur. Les programmes gouvernementaux de déploiement technologique peuvent également stimuler la R&D menée par des entreprises privées en créant des débouchés futurs pour les nouvelles technologies.

Il est particulièrement urgent d'amener au stade industriel les centrales à charbon avancées, couplées à la technologie de captation et de stockage du CO₂. Le charbon pourra ainsi continuer à occuper une place importante dans la palette énergétique d'ici à 2050, ce qui réduira sensiblement les coûts de la transition vers un avenir énergétique plus durable. Pour accélérer l'adoption de la CSC, il faut lancer avant 2015 la démonstration en vraie grandeur d'au moins dix centrales à charbon intégrées et équipées de cette technologie, qui coûteront entre 500 millions d'USD et 1 milliard d'USD chacune. Ces

projets ne pourront être menés à bien que si les gouvernements s'engagent plus résolument en faveur du développement et de la diffusion de la CSC, en collaborant étroitement avec le secteur privé. Il sera en outre déterminant d'associer à ce processus les pays en développement dotés d'abondantes réserves charbonnières, comme la Chine. Des initiatives analogues seront nécessaires également pour faire parvenir à l'échelle industrielle la technologie des réacteurs nucléaires de quatrième génération.

Les pouvoirs publics doivent créer un cadre stratégique stable qui favorise les solutions énergétiques à faible émission de carbone

Les nouvelles technologies de l'énergie seront peut-être plus onéreuses, même après s'être effectivement imposées sur le marché, que celles qu'elles sont destinées à remplacer. Par exemple, la CSC n'aura guère d'impact notable sans incitations économiques durables à réduire les émissions de CO₂. Les scénarios ACT prévoient notamment la mise en œuvre généralisée de technologies qui entraîneront une majoration des coûts pouvant atteindre 25 USD par tonne de CO₂ en 2050. Plusieurs stratégies sont envisageables pour ce faire, par exemple recourir à des systèmes nationaux et internationaux de plafonnement et d'échanges, mais aussi prendre des mesures fiscales et réglementaires à l'échelon national. Des incitations seront nécessaires dans les pays développés ainsi que dans les pays en développement. Celles qui s'adresseront aux industries à forte intensité énergétique devront être coordonnées au niveau international pour éviter le risque de délocalisation d'usines vers des pays moins sévèrement réglementés, qui entraînerait, en fait, une augmentation des émissions mondiales de CO₂.

Les obstacles non économiques doivent aussi retenir l'attention

Plusieurs autres obstacles, qui ne sont ni d'ordre économique ni d'ordre technique, peuvent retarder ou empêcher l'innovation et le déploiement sur le marché des nouvelles technologies de l'énergie. Ils peuvent se présenter sous de multiples formes, par exemple des règles de planification et d'octroi de licences, un manque d'information, des carences dans l'éducation et la formation, des réglementations de santé et de sécurité, ou l'absence de coordination entre différents secteurs. Ce sont autant de facteurs qui appellent l'attention, si l'on veut que le potentiel des technologies prometteuses se concrétise.

La collaboration entre pays développés et en développement sera indispensable

En 2050, les plus gros consommateurs d'énergie dans le monde seront les pays en développement, dont beaucoup affichent une croissance rapide dans tous les secteurs consommateurs d'énergie. Il leur faudra par conséquent réfléchir, eux aussi, à des politiques de sécurité énergétique et de lutte contre les émissions de CO₂. L'économie énergétique mondiale doit se transformer profondément pour répondre aux aspirations légitimes des citoyens des pays en développement à bénéficier de services énergétiques, ainsi que pour garantir les

approvisionnements et assurer un développement durable. Les pays développés ont un rôle important à jouer en aidant les pays en développement à brûler les étapes du processus de développement technologique et à adopter des équipements et des pratiques efficaces, à la faveur du transfert de technologies, du renforcement des capacités et des efforts de RD&D en coopération. Les pays en développement en expansion rapide offrent des occasions d'accélérer l'apprentissage technologique et d'abaisser les coûts des technologies, par exemple à haut rendement énergétique.

*This document was originally published in English.
While the IEA has made every effort to ensure that this French translation
is true to the original English text, there may be some slight differences.*

The Online Bookshop

International Energy Agency



All IEA publications can be bought
online on the IEA website:

www.iea.org/books

You can also obtain PDFs of
all IEA books at 20% discount.

Books published before January 2005
- with the exception of the statistics publications -
can be downloaded in PDF, free of charge,
from the IEA website.

IEA BOOKS

Tel: +33 (0)1 40 57 66 90

Fax: +33 (0)1 40 57 67 75

E-mail: books@iea.org

International Energy Agency
9, rue de la Fédération
75739 Paris Cedex 15, France

CUSTOMERS IN NORTH AMERICA

Turpin Distribution
The Bleachery
143 West Street, New Milford
Connecticut 06776, USA
Toll free: +1 (800) 456 6323
Fax: +1 (860) 350 0039
oe.cdna@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com

***You can also send
your order***

***to your nearest
OECD sales point
or through
the OECD online
services:***

www.oecdbookshop.org

CUSTOMERS IN THE REST OF THE WORLD

Turpin Distribution Services Ltd
Stratton Business Park,
Pegasus Drive, Biggleswade,
Bedfordshire SG18 8QB, UK
Tel.: +44 (0) 1767 604960
Fax: +44 (0) 1767 604640
oe.cdrow@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com