



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

PERSPECTIVES DES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

2
0
0
8

Au service du Plan d'action du G8

Synthèse

Scénarios et
stratégies
à l'horizon
2050



PERSPECTIVES DES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

2
0
0
8

Scénarios et stratégies à l'horizon 2050

Le monde a besoin d'approvisionnements énergétiques toujours plus importants pour accompagner la croissance et le développement économiques. Cependant, des contraintes pèsent sur les ressources en énergie, et les émissions de CO₂ résultant de la consommation actuelle d'énergie menacent d'ores et déjà le climat de notre planète. Quelles solutions pouvons-nous envisager pour changer de cap afin que notre avenir soit fondé sur des énergies plus propres et plus efficaces ? Quel coût devons-nous supporter ? Et quelles politiques devons-nous mettre en œuvre à cet effet ?

Cette deuxième édition de *Energy Technology Perspectives (Perspectives des technologies de l'énergie)* s'attaque à ces questions, en s'appuyant sur la grande compétence des analystes de l'Agence internationale de l'énergie et sur son réseau d'experts internationaux en matière de technologies énergétiques.

Cet ouvrage répond à l'appel adressé par le G8 à l'AIE afin qu'elle formule des orientations à l'intention des décideurs sur les moyens de passer de la réalité d'aujourd'hui à l'action nécessaire pour construire un avenir reposant sur des énergies propres, intelligentes et compétitives.

L'analyse de l'AIE montre qu'un avenir énergétique plus durable est à notre portée, et qu'il passe par la technologie. L'accroissement de l'efficacité énergétique, le captage et le stockage du CO₂, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire auront tous un rôle important à jouer. Nous devons agir dès maintenant si nous voulons mettre en œuvre le potentiel des technologies actuelles et émergentes ainsi que réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles, avec les conséquences qui en découleront pour la sécurité en approvisionnement énergétique et l'environnement.

Ces travaux novateurs mettent en évidence, dans une série ambitieuse de scénarios mondiaux à l'horizon 2050, comment les technologies énergétiques peuvent faire la différence. L'étude présente des feuilles de route technologiques pour tous les grands secteurs énergétiques, notamment la production d'électricité, les bâtiments, l'industrie et les transports. *Energy Technology Perspectives 2008* décrit en détail les technologies et les politiques afin de contribuer à cibler la discussion et le débat dans les milieux de l'énergie.

© OECD/IEA, 2008

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 Communication and Information Office,
9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.

■ SYNTHÈSE

Introduction

Nous sommes confrontés à de graves défis à relever dans le secteur de l'énergie. La croissance de l'économie mondiale devrait être multipliée par quatre d'ici à 2050, et celle de pays en développement tels que la Chine et l'Inde pourrait presque être multipliée par un facteur dix. Des avantages économiques et des progrès considérables en termes de niveau de vie des populations sont à espérer de ce fait ; mais ces progrès seront accompagnés par une forte augmentation de la consommation d'énergie. Il est inévitable que des pressions insoutenables s'exercent sur les ressources naturelles et l'environnement si nous ne parvenons pas à découpler la demande d'énergie de la croissance économique et à réduire la demande de combustibles fossiles.

La situation va en s'aggravant. Depuis l'édition de 2006 de la publication *Energy Technology Perspectives* (ETP, *Perspectives des technologies de l'énergie*), les émissions mondiales de CO₂ et la demande de pétrole n'ont cessé de croître. Atteignant un niveau supérieur de 7 % à celui indiqué dans la première édition d'ETP, les meilleures estimations actuelles de notre scénario de référence tablent sur le *statu quo* – c'est-à-dire, l'absence de changement des politiques en place conjuguée à de très fortes contraintes d'approvisionnement – laissent présager une augmentation de 70 % de la demande de pétrole d'ici à 2050 et une hausse de 130 % des émissions de CO₂. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), un accroissement des émissions de CO₂ de cette ampleur pourrait entraîner une élévation des températures mondiales moyennes de 6°C (niveau de stabilisation à terme), voire plus, qui aurait pour conséquences une modification considérable de tous les aspects de la vie et un changement irréversible de l'environnement naturel.

Il est indispensable d'opérer une révolution mondiale dans les modes de production, d'approvisionnement et de consommation de l'énergie, notamment en augmentant très sensiblement l'efficacité énergétique. Il convient de généraliser le développement des énergies renouvelables, du nucléaire, ainsi que du captage et du stockage du CO₂ (CSC), et de développer les moyens de transport qui n'émettent pas de carbone. **Cela passera par un changement radical des politiques gouvernementales** qui devront particulièrement renforcer la garantie à long terme offerte par les politiques publiques concernant la demande future de technologies à faible émission de carbone, sur laquelle pourront compter les décideurs industriels. Il sera crucial également de porter à **un degré sans précédent la coopération entre toutes les grandes économies**, en gardant à l'esprit la prévision selon laquelle, si les politiques restent inchangées, moins du tiers des émissions mondiales proviendra en 2050 des pays de l'OCDE.

En résumé, **il faudra transformer l'économie énergétique mondiale** au cours des prochaines décennies. Cet ouvrage a pour objectif d'expliquer comment y parvenir. Il présente un examen approfondi de la situation actuelle et des perspectives des technologies énergétiques propres, existantes ou de pointe, en proposant une **analyse de plusieurs scénarios** combinant différentes technologies afin d'améliorer la situation. Cette édition de *Energy Technology Perspectives* définit également des **feuilles de route globales pour les 17 technologies**

dont nous estimons qu'elles peuvent apporter les plus grandes contributions, en indiquant l'action à engager afin de tirer pleinement profit de leurs potentialités, et la meilleure période pour le faire.

Notre analyse par scénario aborde exclusivement les émissions de CO₂ liées à l'énergie, qui représentent la majeure partie des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre. Toutefois, en fin de compte, l'effet sur le changement climatique des réductions des émissions de CO₂ liées à l'énergie dépendra, dans une certaine mesure, de la possibilité d'abaisser ou non les autres émissions dans des proportions équivalentes. C'est pour cela que cette édition comporte également un chapitre sur le méthane, autre gaz à effet de serre important.

L'analyse exposée ici se fonde sur les travaux de modélisation menés au sein du Secrétariat de l'AIE et sur les connaissances spécialisées émanant du réseau de coopération internationale de l'AIE en matière de technologie énergétique. La publication *Energy Technology Perspectives* va de pair avec le *World Energy Outlook 2007* de l'AIE : elle adopte le même scénario de référence à l'horizon 2030, en le prolongeant jusqu'à 2050. La présente étude fait avancer l'analyse contenue dans l'édition ETP 2006 en tenant compte du 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC rendu public en novembre 2007.

Plusieurs scénarios différents y sont présentés. La série de « scénarios ACT » de l'édition ETP 2008 démontre comment les émissions mondiales de CO₂ pourraient être ramenées à leur niveau actuel à l'horizon 2050. La série de « scénarios BLUE » vise une réduction de 50 % des émissions de CO₂ à l'horizon 2050. Cette synthèse s'intéresse à un seul scénario par série, à savoir l'ACT Map et le BLUE Map.

Scénarios ACT

Les technologies qui existent déjà, ou qui se trouvent à un stade avancé de développement, permettront de ramener les émissions mondiales de CO₂ à leur niveau actuel d'ici à 2050, ce qui implique que le niveau maximum d'émissions devra se situer entre 2020 et 2030. Le scénario ACT Map suppose l'adoption d'un large éventail de technologies entraînant un coût marginal inférieur ou égal à 50 USD¹ par tonne de CO₂ évitée lorsque leur commercialisation sera généralisée. Un effort de cette ampleur aura une profonde influence sur certaines activités liées à l'énergie. Il conduirait approximativement à un doublement des coûts de production dans les centrales à charbon dépourvues d'équipements de captage et de stockage du CO₂. Le coût marginal représente le double de celui estimé il y a deux ans dans l'édition ETP 2006, ce qui s'explique surtout par les tendances à la hausse de plus en plus rapide des émissions de CO₂ et par un doublement environ du coût de certains équipements, doublement en partie imputable à la valeur du dollar en baisse.

La tâche à accomplir est difficile et onéreuse. Les besoins d'investissements supplémentaires dans le secteur de l'énergie sont estimés à 17 000 milliards USD d'ici à 2050, soit en moyenne quelque 400 milliards USD par an, ce qui équivaut à peu près au produit intérieur brut (PIB) des Pays-Bas ou à 0.4 % du PIB mondial chaque année d'ici à 2050.

1. Tous les coûts sont exprimés en USD réels de 2005.

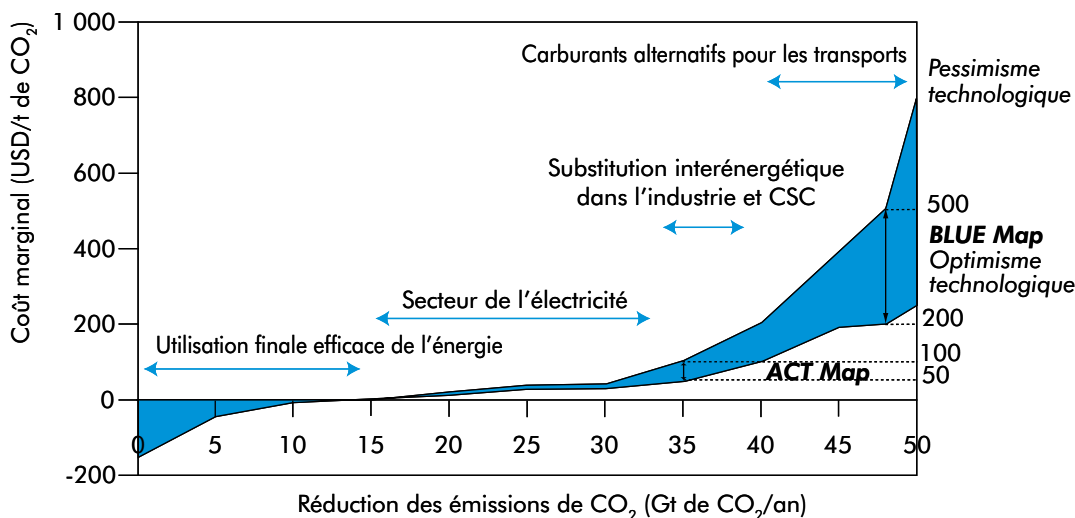
Scénarios BLUE

Toutefois, ramener les émissions au niveau de 2005 risque de ne pas suffire. Le GIEC est arrivé à la conclusion selon laquelle il faut réduire les émissions de 50 % à 85 % d'ici à 2050 si l'on veut limiter le réchauffement de la planète à une élévation des températures comprise entre 2°C et 2,4°C. Les chefs d'État et de Gouvernement des pays du G8 ont convenu, lors du sommet de Heiligendamm en 2007, d'étudier sérieusement la possibilité d'adopter un objectif de réduction de 50 % des émissions mondiales de CO₂.

Abaisser les émissions de CO₂ de 50 % (par rapport au niveau actuel) d'ici à 2050 représente une véritable gageure. Ce scénario nécessite un changement d'orientation très rapide. Les coûts en seraient non seulement beaucoup plus élevés, mais aussi sujets à une incertitude bien plus grande, parce que les scénarios BLUE exigent la mise en service de technologies encore en développement, dont les progrès et le succès final sont difficiles à prédire. **Les scénarios ACT demandent certes un grand effort, mais les scénarios BLUE obligent à mettre en œuvre d'urgence des politiques inédites et de portée bien plus vaste dans le secteur de l'énergie.**

Fondé sur des hypothèses optimistes concernant les progrès des technologies clés, le scénario BLUE Map passe par le déploiement de toutes les technologies entraînant des coûts qui peuvent atteindre 200 USD par tonne d'émissions évitées de CO₂ quand leur commercialisation sera complète. Si les avancées concernant ces technologies ne répondent pas aux attentes, les coûts peuvent se chiffrer à au moins 500 USD par tonne. A la marge, par conséquent, les technologies nécessaires dans le scénario BLUE Map coûtent au moins quatre fois plus cher que les options les plus onéreuses que nécessite l'ACT Map. Néanmoins, le coût moyen des technologies requises pour le BLUE Map est très inférieur au coût marginal, qui se situe dans la fourchette allant de 38 USD à 117 USD par tonne d'émissions évitées de CO₂. La figure ES.1 montre comment, en 2050, les coûts marginaux de la réduction des émissions de CO₂ augmentent dès lors que les objectifs en matière d'émissions évitées de CO₂ dépassent ceux de l'ACT Map pour parvenir aux niveaux plus élevés prévus dans le scénario BLUE Map.

Figure ES.1 ► Coûts marginaux de la réduction des émissions dans le système énergétique mondial, 2050



Les investissements supplémentaires nécessaires dans le scénario BLUE Map s'élevaient à 45 000 milliards USD dans la période qui s'étend jusqu'à 2050. Ils correspondent à de nouvelles activités de R-D, aux investissements consacrés à mettre en œuvre plus largement des technologies qui ne sont pas encore concurrentielles sur le marché (même compte tenu des incitations à la réduction des émissions de CO₂), et à l'investissement commercial dans des options à faible émission de carbone (stimulé par les incitations à la réduction des émissions de CO₂). L'investissement total avoisine 1 100 milliards USD par an ; autrement dit, à peu de chose près, le PIB actuel de l'Italie ou 10 % du PIB actuel des États-Unis. Il représente une moyenne de quelque 1,1 % du PIB mondial chaque année d'ici à 2050. Ces dépenses s'expliquent par la réorientation de l'activité économique et de l'emploi, mais ne traduisent pas nécessairement une réduction du PIB. Il en résultera certainement des répercussions sur le PIB mondial, mais elles sont difficilement prévisibles et n'entrent pas dans le cadre de la présente analyse.

Avantages de l'investissement

Bien que les investissements supplémentaires nécessaires dans les scénarios ACT et BLUE permettent d'avoir une idée de l'ampleur de la tâche à accomplir, il convient de souligner qu'il ne s'agit pas de coûts nets. En effet, les investissements dans les technologies d'efficacité énergétique, de plusieurs énergies renouvelables et de l'énergie nucléaire contribuent tous à réduire les besoins en combustibles. **Tant dans le scénario BLUE que dans le scénario ACT, durant la période allant jusqu'à 2050, les estimations du total des économies de coûts non actualisés des combustibles, s'agissant du charbon, du pétrole et du gaz, sont plus élevées que l'investissement supplémentaire requis dans les technologies** (la valeur retenue pour ces combustibles étant calculée sur la base des prix du scénario de référence). En appliquant un taux d'actualisation de 3 %, les économies de combustibles dépassent les besoins d'investissements supplémentaires dans le scénario ACT Map, mais pas dans les scénarios BLUE. Si ce taux est de 10 %, les investissements supplémentaires nécessaires sont supérieurs aux économies de combustibles dans les deux scénarios, ACT et BLUE.

Certains investissements sont, bien entendu, très rentables, notamment dans le domaine de l'efficacité énergétique. En revanche, dans le haut de la fourchette des coûts nécessaires quand les scénarios BLUE sont concernés, certains investissements ne deviennent rentables qu'avec de fortes incitations à réduire les émissions de CO₂. Néanmoins, les investissements nécessaires ne font pas tous baisser les coûts en combustible. Ainsi l'investissement dans la technologie CSC fera au contraire augmenter la quantité de charbon nécessaire pour une production électrique donnée, du fait de la diminution du rendement des centrales qui en seront équipées.

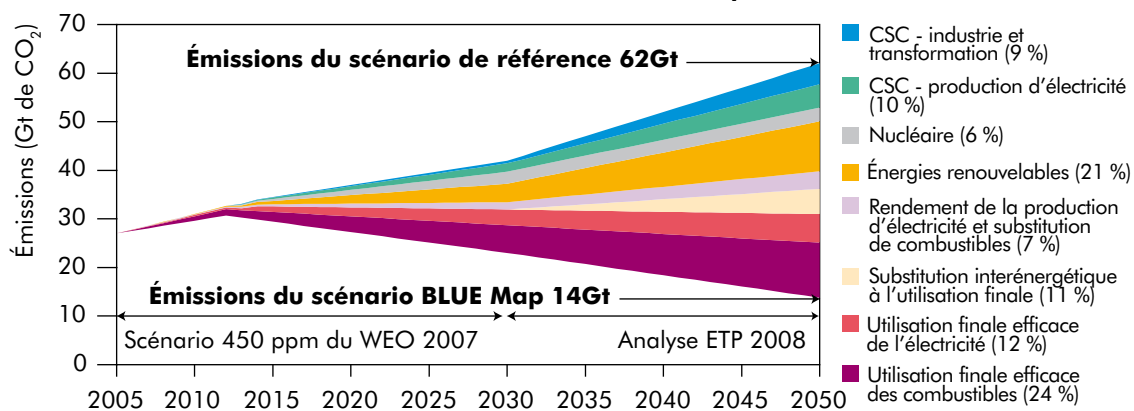
Un marché pétrolier plus équilibré

Outre leurs avantages pour l'environnement, les scénarios ACT et BLUE laissent également augurer de perspectives plus équilibrées sur les marchés pétroliers. Dans le scénario ACT Map, la demande de pétrole continue de croître : elle augmente de 12 % d'ici à 2050, c'est-à-dire beaucoup moins que dans le scénario de référence. Dans le scénario BLUE Map, la différence est bien plus prononcée, la demande de pétrole étant en fait, à l'horizon 2050, inférieure de 27 % au niveau observé aujourd'hui. Nonobstant, quel que soit le scénario envisagé, des investissements massifs seront nécessaires pour s'approvisionner en combustibles fossiles au cours des prochaines décennies.

La révolution technologique

Dans le scénario ACT comme dans le scénario BLUE, **les améliorations de l'efficacité énergétique des bâtiments, des appareils ménagers, des transports, de l'industrie et de la production d'électricité constituent les sources d'économies d'énergie les plus vastes et les moins coûteuses.** Elles sont suivies, par ordre d'importance, par les mesures destinées à nettement **décarboniser la production d'électricité.** Pour ce faire, nous pouvons associer les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire et l'utilisation de la technologie CSC dans les centrales alimentées aux combustibles fossiles. Quel que soit l'objectif final, il est urgent et indispensable d'engager des actions dans tous ces domaines. Il importe tout particulièrement d'éviter un « verrouillage » de technologies inefficaces pendant des décennies. Dans le scénario BLUE Map, le déploiement d'options plus onéreuses, tels **les carburants alternatifs pour les transports et la technologie CSC dans l'industrie,** s'impose. La figure ES.2 compare les moyens d'éviter des émissions de CO₂ prévus dans le scénario BLUE Map aux moyens pris en compte dans le scénario de référence. Les décideurs publics devraient garder présents à l'esprit les délais, souvent longs, de mise en œuvre nécessaires pour concrétiser tout changement, sans oublier non plus que les priorités de chaque pays diffèrent selon leur situation nationale. De plus, réduire les émissions de méthane constitue également un volet important dans une stratégie globale relative au changement climatique, car ces émissions présentent, à court terme, des possibilités non négligeables de réduction des émissions de gaz à effet de serre efficaces par rapport à leurs coûts.

Figure ES.2 ► Comparaison du scénario de stabilisation à 450 ppm du *World Energy Outlook 2007* et du scénario BLUE Map, 2005-2050



Bâtiments et appareils électroménagers

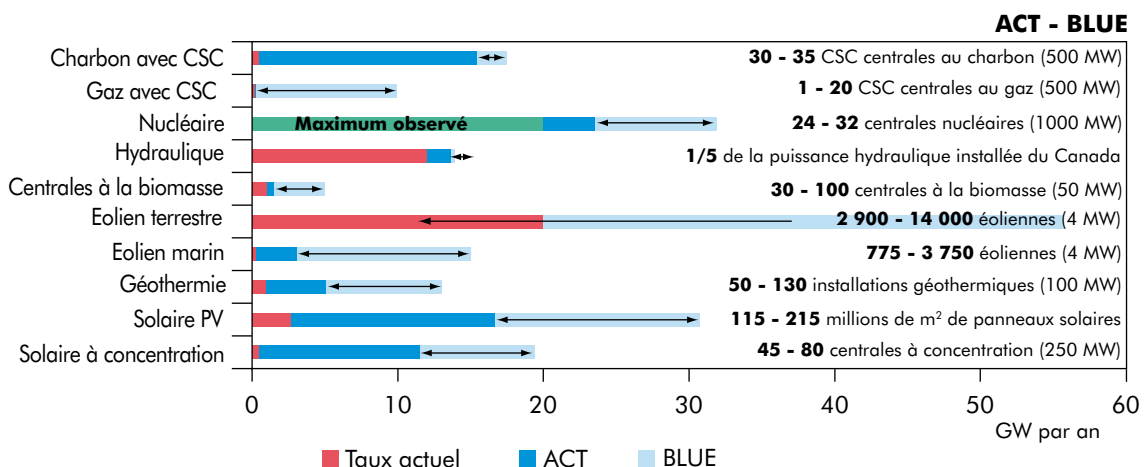
Les scénarios ACT peuvent devenir réalité en utilisant des technologies pour le bâtiment et les appareils électroménagers qui sont amplement disponibles de nos jours et économiquement viables en tenant compte des coûts sur l'ensemble du cycle de vie. Mais les scénarios BLUE nécessitent des technologies nouvelles ou émergentes, lesquelles dans certains cas ne sont rentables que si les coûts de la réduction des émissions de CO₂ sont relativement élevés, du moins au début de leur déploiement. La transformation généralisée des bâtiments afin qu'ils consomment très peu d'énergie, voire pas du tout (bâtiments zéro énergie), est prévue dans ces scénarios. **L'application de normes de rendement aux**

bâtiments et aux appareils ménagers aura des conséquences considérables au plan de l'action des pouvoirs publics. La mise en œuvre conjuguée de mesures applicables à l'enveloppe des bâtiments, de pompes à chaleur, du chauffage solaire ainsi que d'appareils électroménagers et d'éclairage à haut rendement réduit les besoins en énergie des bâtiments, tout comme elle permet de substituer aux combustibles précédemment utilisés des énergies renouvelables ou de l'électricité produite en émettant peu de carbone. Le scénario BLUE Map suppose un investissement supplémentaire de 7 400 milliards USD dans les bâtiments du secteur résidentiel et des services, contre 2 600 milliards USD pour le scénario ACT Map.

Le secteur de l'électricité

La nouvelle technologie de captage et de stockage du CO₂ dans la production d'électricité et l'industrie est la plus importante pour éviter d'émettre du CO₂, tant dans le scénario ACT Map que dans le scénario BLUE Map, dans lesquels 14 % et 19 % des émissions évitées totales de CO₂ lui sont respectivement attribués. Le scénario BLUE Map prévoit notamment des applications coûteuses de la technologie CSC dans l'industrie et les centrales à gaz. **Les énergies renouvelables sont massivement adoptées pour produire de l'électricité, en particulier l'énergie éolienne, la photovoltaïque, le solaire à concentration et la biomasse.** A l'horizon 2050, 46 % du total de l'électricité produite dans le scénario BLUE Map l'est à partir d'énergies renouvelables. L'application conjuguée de toutes les technologies des énergies renouvelables, dans tous les secteurs, permet d'éviter de rejeter 21 % des émissions de CO₂ dans le scénario BLUE Map, par rapport aux chiffres du scénario de référence. Un basculement important vers l'énergie nucléaire contribue à éviter 6 % des émissions de CO₂, en retenant comme hypothèse la construction de 32 GW de puissance installée chaque année d'ici à 2050. Le nucléaire assure près d'un quart de la production d'électricité dans le scénario BLUE Map et l'hydraulique la moitié de cette proportion, compte tenu du rôle déjà important de ces deux technologies dans le scénario de référence. La figure ES.3 donne un aperçu des taux annuels auxquels il faudrait accroître la puissance électrique installée dans chacun des scénarios considérés.

Figure ES.3 ► Investissements additionnels dans le secteur de l'électricité pour les scénarios ACT Map et BLUE Map (par rapport au scénario de référence 2005-2050)



Il ressort du large éventail de scénarios de production d'électricité pris en considération que **chaque pays dispose d'une latitude de choix considérable concernant la panoplie précise de technologies de CSC, des énergies renouvelables et nucléaire qu'il retiendra pour décarboniser le secteur électrique**. L'investissement supplémentaire total dans le secteur de l'électricité (hors transport et distribution) s'élève à 700 milliards USD dans le scénario ACT Map et à 3 600 milliards USD dans le scénario BLUE Map. Ces chiffres sont le résultat net de la conjonction des coûts d'investissement plus élevés par unité de puissance installée et de la réduction d'un cinquième de la production d'électricité imputable à des économies d'électricité au stade de l'utilisation finale. Un des postulats considérés dans **les scénarios BLUE est que des équipements seront mis hors service de façon anticipée** : par exemple, un tiers de l'ensemble des centrales au charbon ne se prêtant pas à l'ajout de la technologie CSC devront être fermées avant d'arriver en fin de vie technique. Il est admis qu'il s'agira d'un grand pas à franchir pour les pays très tributaires du charbon, processus néanmoins nécessaire qui devra être mené à bien avec rigueur.

Transports

Dans le scénario ACT Map, les économies d'énergie et les émissions évitées dans le secteur des transports proviennent, dans une large mesure, d'améliorations considérables **de l'efficacité énergétique des véhicules classiques** et à la pénétration accrue des véhicules hybrides. Les biocarburants à faible empreinte de carbone ont un rôle à jouer, surtout pour remplacer l'essence automobile. Il est par ailleurs essentiel de mettre un frein à la tendance actuelle à privilégier les véhicules plus spacieux et plus lourds.

Dans ce domaine, **le scénario BLUE Map est très ambitieux et nécessite une décarbonisation importante des transports**, qui sera vraisemblablement beaucoup plus coûteuse dans un secteur où prédomine jusqu'ici le moteur à combustion interne. Les biocarburants à faible émission de carbone devraient, selon les prévisions, occuper une grande place dans le scénario BLUE Map, dans les limites d'une production et d'une culture durables. Le transport routier de marchandises, la navigation et le transport aérien sont les principaux utilisateurs de biocarburants, étant donné que les autres options, sans recours aux hydrocarbures, risquent de se révéler très onéreuses pour ces modes de transport. Si les batteries électriques et les piles à combustible à l'hydrogène sont les principales solutions de recharge pour les voitures, il est difficile de déterminer, pour l'heure, laquelle de ces technologies, ou quelle panoplie d'entre elles, sera la plus compétitive. En tablant sur des hypothèses relativement optimistes concernant le progrès technologique et les réductions de coûts, les véhicules électriques et à pile à combustible devraient coûter quelque 6 500 USD de plus que les véhicules classiques en 2050. Dans le scénario BLUE Map, près d'un milliard de véhicules électriques et à pile à combustible doivent être en circulation en 2050. Les transports représentent le secteur d'investissement le plus important dans les scénarios considérés. Les investissements supplémentaires nécessaires dans les transports se montent à 33 000 milliards USD dans le scénario BLUE Map et à 17 000 milliards USD dans le scénario ACT Map.

Industrie

Que ce soit directement ou indirectement, l'industrie manufacturière absorbe plus du tiers de la consommation énergétique mondiale et rejette la même proportion d'émissions de CO₂. La sidérurgie et l'industrie du ciment produisent la moitié environ

des émissions du secteur industriel ; la chimie et la pétrochimie sont également des sources d'émissions très importantes. L'industrie lourde a enregistré ces dernières années de bons résultats en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique, en raison de la nécessité de maîtriser les coûts de l'énergie. Il reste cependant à exploiter des possibilités importantes de mettre en œuvre d'autres gains d'efficacité, en particulier dans les industries à plus faible intensité énergétique, en améliorant notamment le rendement des systèmes motorisés et de la cogénération de chaleur et d'électricité. De même, il existe un potentiel de progrès technologique propre à chaque industrie, ainsi que la possibilité d'appliquer la technologie CSC.

De très fortes réductions des émissions industrielles de CO₂ sont difficiles à atteindre. Dans le scénario ACT Map, les émissions de CO₂ de l'industrie qui sont liées à l'énergie dépassent de 63 % en 2050 celles de 2005. Dans le scénario BLUE Map, elles sont inférieures de 22 % à leur niveau actuel, surtout par suite de l'application généralisée de la technologie CSC dans les grandes installations à forte intensité énergétique. Les émissions de CO₂ évitées directement et indirectement dans le scénario BLUE Map sont considérables, puisqu'elles sont voisines de 10 Gt de CO₂ par an. Pour moderniser les installations industrielles, le scénario BLUE Map nécessite des investissements supplémentaires de 2 500 milliards USD par rapport au scénario de référence – essentiellement dans les secteurs de l'acier, du ciment et de la pâte à papier – et pour élargir le déploiement de la technologie CSC.

Tendances de l'efficacité énergétique

Il est essentiel d'améliorer très sensiblement l'efficacité énergétique, en comparaison des tendances récemment observées. Dans les pays de l'OCDE, le gain en efficacité était au cours des années dernières inférieur à 1 % par an, soit un très net recul par rapport à l'évolution constatée immédiatement après les chocs des prix pétroliers du début des années 70. Le scénario ACT Map exige des améliorations soutenues de l'efficacité énergétique à l'échelle mondiale à un taux de 1,4 % par an alors que, dans le scénario BLUE Map, ce taux doit atteindre 1,7 %. Bien que ces écarts de pourcentages puissent paraître faibles, la différence de 0,3 point de pourcentage entre les scénarios ACT Map et BLUE Map correspond à des économies d'énergie finale supplémentaires de 1 544 Mtep en 2050, soit 20 % de la consommation finale totale d'énergie d'aujourd'hui.

Recherche, développement et démonstration

Certaines des technologies nécessaires pour que les scénarios BLUE se réalisent ne sont pas encore disponibles. Beaucoup d'autres doivent encore faire l'objet de perfectionnement et de réduction des coûts. Un immense effort de recherche, développement et démonstration (RD-D) sera par conséquent impératif. Or, les dépenses publiques et privées consacrées à la RD-D énergétique ont baissé par rapport aux niveaux des années 70 et 80, et se sont maintenant stabilisées à un niveau relativement faible. Nombre de pays de l'OCDE y consacrent moins de 0,03 % du PIB, à l'exception du Japon dont les dépenses correspondent à 0,08 %. De nos jours, les dépenses du secteur privé dans les activités de RD-D énergétique sont largement plus importantes que celles

du secteur public. Bien qu'il soit difficile d'établir des données détaillées, des études indépendantes ont indiqué qu'il est nécessaire de multiplier de deux à dix fois les dépenses actuelles de RD-D du secteur public. Nous ne fixons pas d'objectif précis, mais il est évident qu'**il convient d'accélérer considérablement l'effort de RD-D** pour faire avancer les nouvelles technologies et réduire les coûts de celles qui sont déjà disponibles. **Des technologies décisives, notamment celles du solaire photovoltaïque, des centrales à charbon à la technologie avancée, des biocarburants de pointe, de captage du CO₂, des batteries électriques, des piles à combustible et de la production d'hydrogène, doivent progresser davantage et des solutions pour en abaisser les coûts sont indispensables.** Même en cas de fortes hausses, le coût de la R-D est relativement moindre – en général, il se chiffre à dix fois moins – que celui des programmes de démonstration en grandeur réelle et de déploiement. **Des activités de R-D énergétique bien orientées offrent un excellent rapport coût-bénéfice.**

Tout en diminuant les risques associés à la première phase de commercialisation, le soutien des pouvoirs publics est également nécessaire pour réaliser la démonstration à grande échelle des nouvelles technologies. A cet égard, la démonstration à l'échelle industrielle des centrales à charbon équipées de la technologie CSC est une nécessité impérieuse.

Les sciences fondamentales dans des domaines tels que la géologie, la physique, la chimie, les matériaux, la biochimie, les nanotechnologies et les mathématiques appliquées peuvent donner lieu à de grandes percées dans des secteurs déterminants. **Il est essentiel de renforcer les bases scientifiques, et de resserrer les liens entre chercheurs et ingénieurs.**

Déploiement et apprentissage des technologies

La plupart des nouvelles technologies sont plus coûteuses que celles en place. C'est seulement par *l'apprentissage technologique* découlant du déploiement sur le marché que ces coûts baisseront et que le produit s'adaptera au marché. **Les pouvoirs publics doivent donner plus de poids à leurs programmes de déploiement.** Les énergies renouvelables de deuxième génération, comme le solaire et les biocarburants, sont parmi les technologies qui offrent les plus larges possibilités. Dans le scénario ACT Map, nous estimons que 2 800 milliards USD doivent être consacrés d'ici à l'an 2050 pour financer les surcoûts (en plus de la valeur marchande) du déploiement des nouvelles technologies. Dans le scénario BLUE Map, ce montant s'élève à 7 000 milliards USD.

Réglementation

Les obstacles à la mise en œuvre des nouvelles technologies ne sont pas toujours de caractère économique et, pour les surmonter, des réglementations et des normes rigoureusement conçues sont souvent les mesures les plus efficaces qui s'offrent aux pouvoirs publics. Dans tous les scénarios, il sera essentiel d'instaurer des **réglementations rigoureuses relatives à l'efficacité des bâtiments, des appareils électroménagers et des véhicules.** Tant dans les pays développés que dans ceux en voie de développement, rendre plus strictes les réglementations concernant l'efficacité et œuvrer pour mieux les faire respecter sont souvent des

solutions intéressantes et efficaces en terme de coûts-bénéfices que les pouvoirs publics peuvent appliquer immédiatement. L'une des clés du succès des scénarios BLUE sera l'acceptation par le public des normes nécessaires pour rendre la consommation d'énergie des bâtiments très faible voire nulle, et pour diviser par quatre l'intensité d'émissions de CO₂ des véhicules.

Incitations

L'investissement du secteur privé est et restera le principal catalyseur du déploiement et de la diffusion des technologies. L'AIE a débattu des répercussions des scénarios BLUE et ACT avec les directeurs techniques de 30 entreprises énergétiques internationales de premier plan. Ils ont insisté sur **la nécessité urgente de concevoir et de mettre à exécution une panoplie de mesures créant des incitations économiques à long terme, claires et prévisibles, en faveur de la réduction des émissions de CO₂ sur le marché**. C'est uniquement à cette condition que les entreprises seront en mesure d'engager les programmes d'investissement massifs qui s'imposent.

Cette analyse n'entend pas aborder les particularités des mécanismes qu'il faudra utiliser, sachant que cette tâche est, dans une certaine mesure, l'objet des négociations menées dans le contexte de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. S'agissant des scénarios ACT, nous avons estimé que ces mécanismes doivent être suffisants pour offrir des incitations à adopter des technologies qui, lorsqu'elles seront complètement commercialisées, auront un coût marginal de 50 USD par tonne de CO₂ évitée. Quant aux scénarios BLUE, ce chiffre représente au minimum 200 USD par tonne de CO₂ évitée, et pourrait atteindre plus de 500 USD si les progrès des technologies clés sont décevants. L'application des incitations doit être généralisée dans toutes les grandes économies par le biais d'une panoplie de mesures politiques très variées.

Ces incitations ne doivent pas forcément viser l'uniformité en attribuant la même valeur à toutes les technologies. En particulier dans les scénarios BLUE, **il peut être approprié d'adopter des mécanismes ciblés pour les technologies les plus onéreuses**. Les ensembles de mesures, qui peuvent prendre diverses formes, doivent être en vigueur dans les pays de l'OCDE à l'horizon 2020, et à l'horizon 2030 dans les autres grands pays. Les scénarios BLUE tablent sur une rigueur nettement accrue après ces échéances. Afin d'en récolter tous les fruits et de procéder à une transition sans heurts, il est essentiel que la prévision des objectifs et des incitations soit établie avec clarté dès le début.

Opinion publique

Les gouvernements devront montrer la voie à l'opinion publique, en faisant ressortir la relation entre la nécessité impérieuse de la lutte contre le changement climatique, laquelle est largement admise, et les projets spécifiques à mettre en œuvre, qui se heurtent souvent à l'opposition du public. Aucun des scénarios ACT et BLUE ne peuvent se matérialiser sans un changement fondamental de priorités, et **ce changement doit être radical et opéré d'urgence** dans le cas des scénarios BLUE.

Faire avancer la coopération internationale

La coopération internationale est essentielle pour accélérer de la façon la plus efficace le développement et le déploiement dans le monde entier des technologies énergétiques durables. Il existe d'ores et déjà un réseau qui s'y emploie. L'AIE elle-même a établi le réseau de loin le plus diversifié, dans lequel des milliers d'experts en technologies à travers le monde coordonnent leurs programmes de technologie de l'énergie. Les programmes de technologie de l'énergie de l'Union Européenne, le Partenariat Asie-Pacifique sur le développement propre et le climat, le Forum pour la gestion de la séquestration du carbone, le Biofuels Partnership (partenariat pour les biocarburants), le Partenariat international sur l'économie de l'hydrogène, le Forum International Génération IV et le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire en sont d'autres exemples notables. **Ces réseaux ont besoin d'une puissante impulsion internationale donnée par les décideurs publics au plus haut niveau.**

Cet ouvrage propose les premières tentatives de définition de feuilles de route à l'échelon mondial pour les technologies énergétiques clés. Nous en avons recensé 17 qui concernent l'efficacité énergétique, la production d'électricité et les transports. Elles sont au cœur de la révolution technologique dans le domaine de l'énergie. Nous décrivons dans cette publication les initiatives à prendre pour en exploiter toutes les potentialités. Ces initiatives sont spécifiques selon les technologies considérées, et dépendent en partie de leur état actuel d'avancement. Ces feuilles de route peuvent être d'une grande utilité dès lors qu'elles fournissent des indications sur l'ampleur de la réduction des émissions qu'il faudrait viser dans chaque secteur et pour chaque technologie, ainsi que sur la question de savoir si ce processus est d'ores et déjà en bonne voie ou non. **Une définition plus fine de ces feuilles de route, en accord avec des orientations internationales, et qui rassemble les programmes de technologie de l'énergie de toutes les grandes économies, tout en menant des consultations étroites avec l'industrie, est de nature à mettre en relief les priorités pour resserrer considérablement la coopération internationale que nécessite la révolution technologique mondiale dans le domaine de l'énergie.** L'AIE est prête à contribuer à cet effort afin d'aboutir à un avenir énergétique plus durable.

Tableau ES.1 ► Principales feuilles de route de cette étude

Du côté de l'offre	Du côté de la demande
<ul style="list-style-type: none"> ■ Production d'électricité à partir de combustibles fossiles avec CSC ■ Centrales nucléaires ■ Eoliennes terrestres et marines ■ Biomasse : gazéification intégrée à un cycle combiné et co-combustion ■ Systèmes photovoltaïques ■ Solaire à concentration ■ Charbon : systèmes de gazéification intégrée à un cycle intégré ■ Charbon : centrales à cycle de vapeur ultrasupercritique ■ Biocarburants de deuxième génération 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité énergétique des bâtiments et appareils électroménagers ■ Pompes à chaleur ■ Chauffage solaire des locaux et de l'eau ■ Efficacité énergétique dans les transports ■ Véhicules électriques et « plug-in » ■ Véhicules à pile à combustible ■ CSC : industrie, transformation du H2 et des combustibles ■ Systèmes de moteurs industriels

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) est un organe autonome institué en novembre 1974 dans le cadre de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) afin de mettre en œuvre un programme international de l'énergie.

Elle applique un programme général de coopération dans le domaine de l'énergie entre vingt-sept des trente pays membres de l'OCDE. Les objectifs fondamentaux de l'AIE sont les suivants :

- Tenir à jour et améliorer des systèmes permettant de faire face à des perturbations des approvisionnements pétroliers.
- Œuvrer en faveur de politiques énergétiques rationnelles dans un contexte mondial grâce à des relations de coopération avec les pays non membres, l'industrie et les organisations internationales.
- Gérer un système d'information continue sur le marché international du pétrole.
- Améliorer la structure de l'offre et de la demande mondiales d'énergie en favorisant la mise en valeur de sources d'énergie de substitution et une utilisation plus rationnelle de l'énergie.
- Promouvoir la collaboration internationale dans le domaine de la technologie énergétique.
- Contribuer à l'intégration des politiques d'énergie et d'environnement.

Les pays membres de l'AIE sont : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Japon, Luxembourg, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Portugal, République de Corée, République Slovaque, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Turquie. Il est envisagé que la Pologne devienne membre en 2008. La Commission Européenne participe également aux travaux de l'AIE.

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de trente démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Luxembourg, Mexique, Norvège, Nouvelle Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République de Corée, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

© OCDE/AIE, 2008

Agence Internationale de l'Énergie (AIE),
Direction du Service de la communication et de l'information,
9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.

Ce rapport a été initialement publié en anglais. Bien que l'AIE ait tout mis en œuvre pour faire en sorte que sa traduction en français soit fidèle à l'original, il n'est pas à exclure quelques légères différences.

La diffusion de cette publication est soumise à des conditions qui en limitent l'usage et la communication et dont les termes sont disponibles sur le site :
<http://www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp>

The Online Bookshop

International Energy Agency



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

www.iea.org/books

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

Books published before January 2007
- 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
oecdna@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com

You may also send

your order

to your nearest

OECD sales point

or use

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
oecdrow@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com