

Energy AND Security

AN I E E R P U B L I C A T I O N

Sans carbone et sans nucléaire *Une feuille de route pour la politique énergétique des États-Uni*

No. 39, 2007

- [Note](#)
- [Conclusion Centrale de l'Étude](#)
- [Introduction](#)
- [Principales Conclusions de l'Étude](#)
- [Synthèse des Principales Conclusions](#)
- [Recommandations: Les douze principes anti-CO₂](#)
- [Glossaire](#)
- [Notes](#)

Crédits pour ce numéro:

- Traduction: Annike Thierry, avec la collaboration de: Jean-Luc Thierry et Annie Makhijani.
- Rédactrice en chef: Lisa Ledwidge.
- La version anglaise de ce numéro, *Science for Democratic Action* v. 15, no. 1, a été publiée en août 2007.

Note de la rédaction : L'Institut pour la recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER) a exploré des domaines où personne ne s'était aventuré auparavant. En partenariat avec le *Nuclear Policy Research Institute*, l'IEER publiera en août 2007 une étude scientifique révolutionnaire : une feuille de route qui permet aux États-Unis d'arriver à réduire ses émissions de CO₂ – jusqu'à zéro – tout en sortant du nucléaire. Ce numéro spécial d'Énergie et Sécurité constitue le Résumé analytique de ce rapport, qui sera publié sous forme de livre en octobre. D'autres ressources, notamment un guide pour les élus pour une économie américaine zéro-CO₂ et sans nucléaire sera accessible sur le site internet de l'IEER (www.ieer.org) très prochainement .

Note de l'auteur : Je tiens à remercier le *Nuclear Policy Research Institute* pour le soutien qu'il a apporté à ce projet qui aboutira au livre sur lequel se fonde ce numéro d'Énergie et Sécurité. Helen Caldicott a été la bonne fée qui a dirigé la campagne de financement, apporté des commentaires critiques et des suggestions et a eu le discernement qui m'a convaincu de la nécessité de réaliser cette étude de toute urgence. Les présentations d'Helen et David Freeman lors de la conférence du NPRI de 2006 sur l'énergie, et nos discussions privées par la suite, m'ont donné l'idée d'écrire le livre.

Je remercie Julie Enszer d'avoir piloté ce projet en souplesse du début jusqu'à la fin. Je souhaite également remercier Hisham Zerriffi, Jenice View et Paul Epstein qui, en tant que membres du comité consultatif du projet (avec Helen, Dave et d'autres personnes) ont apporté de précieuses réflexions et critiques sur le manuscrit initial et cette synthèse. Il est toutefois possible qu'ils ne se trouvent pas en accord avec les recommandations ou les conclusions de cette synthèse. Le livre fera figurer les prises de position des membres du Comité qui souhaitent apporter un commentaire. Des remerciements plus exhaustifs apparaîtront dans le livre.

Conclusion Centrale de l'Étude

La conclusion primordiale de l'étude sur laquelle se fonde ce numéro de SDA est qu'une économie américaine sans CO₂ peut être obtenue dans les trente à cinquante ans qui viennent, sans utilisation de l'énergie nucléaire et sans un système d'échange des crédits de carbone avec d'autres pays. En d'autres termes, les émissions physiques du secteur énergétique peuvent être éliminées avec des technologies qui sont actuellement disponibles ou le seront dans un avenir prévisible.

Ceci peut se faire à un coût raisonnable tout en instaurant un approvisionnement énergétique beaucoup plus sûr qu'aujourd'hui. Les importations nettes de pétrole des États-Unis peuvent être supprimées en l'espace d'environ 25 ans. Ceci permettra de répondre aux trois formes d'insécurité : le dérèglement climatique grave, l'insécurité sur l'approvisionnement et les prix du pétrole, et la prolifération nucléaire par le biais du nucléaire civil. Il y aura en outre d'importants avantages annexes en termes de santé grâce à l'élimination de la plus grande partie de la pollution atmosphérique régionale et locale, comme les niveaux élevés d'ozone et de particules dans les grandes villes, qui sont dus à la combustion des combustibles fossiles.

Introduction

Une triple crise énergétique mondiale a commencé à émerger dans les années 1970 ; elle est maintenant entrée dans une phase aiguë sur trois fronts :

- 1) **Le dérèglement climatique** : Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) issues de la combustion des combustibles fossiles constituent la principale cause anthropique de dérèglement climatique grave dont la continuation laisse présager des dommages sérieux et irréparables à l'économie mondiale, à la société et aux écosystèmes existants.
- 2) **L'insécurité de l'approvisionnement pétrolier** : L'augmentation rapide de la consommation mondiale en pétrole et les conflits au sein des régions exportatrices ainsi que les conflits de concurrence envers ces régions exportatrices se manifeste par une instabilité des prix et une insécurité de l'approvisionnement.
- 3) **La prolifération nucléaire** : La diffusion de la technologie nucléaire civile, présentée comme une solution essentielle à la réduction des émissions de CO₂, contribue à fragiliser la non-prolifération des armes nucléaires.

Après une décennie de divisions au niveau mondial, il existe aujourd'hui un consensus sur la nécessité d'une action résolue pour réduire les émissions de CO₂, y compris par les États-Unis, comme le montre l'avis émis en avril 2007 par la Cour Suprême² américaine établissant que le CO₂ est un polluant, et par la pléthore des projets de lois au Congrès. Beaucoup de solutions proposées pourraient mettre les États-Unis sur le bon chemin, en reconnaissant la nécessité de réduire les émissions de CO₂ et en la codifiant à travers la loi et la réglementation. Mais il faudra beaucoup plus. En outre, la plupart des solutions avancées risquent d'être inadaptées à la tâche et certaines, comme le développement de l'énergie nucléaire ou l'utilisation généralisées de cultures vivrières pour la production de carburant, sont susceptibles d'aggraver les troubles sociaux et politiques du monde, ainsi que la sécurité internationale. Certaines, comme la production de biocombustibles à partir d'huile de palme indonésienne, peuvent même accroître les émissions de CO₂.

Notre rapport, résumé dans ce numéro d'Énergie et Sécurité, étudie la faisabilité technique et économique d'une économie américaine sans émissions de CO₂ et sans énergie nucléaire. Ceci est pris dans le sens d'une élimination quasi-totale des émissions de CO₂ à l'exception de quelques pour cent, ou une élimination complète avec la possibilité de retirer de l'atmosphère une partie du CO₂ qui a déjà été émis. Nous nous sommes fixé pour objectif de répondre à trois questions :

- Est-il possible de supprimer physiquement les émissions de CO₂ du secteur de l'énergie américain sans recourir à l'énergie nucléaire, qui présente de sérieuses vulnérabilités en matière de sécurité et dans d'autres domaines ?
- Une économie « zéro-CO₂ » est-elle possible sans un système d'échange des crédits de carbone avec d'autres pays, c'est-à-dire sans acheter à d'autres pays le droit de continuer à émettre du CO₂ aux États-Unis ?
- Est-il possible d'atteindre les objectifs évoqués plus haut à un prix raisonnable ?

Pour arriver à une économie « zéro-CO₂ » sans énergie nucléaire, il sera nécessaire de faire preuve d'une prévoyance sans précédent et de veiller à une coordination des politiques, du niveau local au niveau national, dans l'ensemble des secteurs du

système énergétique. Une bonne partie du ferment à l'œuvre au niveau local et au niveau des États, ainsi que certaines propositions au Congrès, vont déjà dans le bon sens. Mais il est nécessaire d'avoir un objectif clair à long terme pour assurer une cohérence politique globale et définir une unité de comparaison pour mesurer les avancées.

Une économie américaine zéro-CO₂ sans énergie nucléaire n'est pas seulement réalisable : elle est nécessaire pour la protection de l'environnement et la sécurité. Le processus amenant les États-Unis à définir l'objectif d'une économie zéro-CO₂ et sans nucléaire, et à prendre les premières mesures fermes en ce sens, suffira à transformer la politique énergétique mondiale à brève échéance et fera des États-Unis un pays qui montre l'exemple au lieu de prêcher la modération assis au comptoir d'un bar.

Les tableaux 1 et 2 fournissent une ébauche de la feuille de route vers une économie zéro-CO₂ avec des prévisions de dates auxquelles des technologies peuvent être déployées ainsi que des recommandations concernant la recherche, le développement et la démonstration.

Principales Conclusions de L'étude

Conclusion 1 : *L'objectif d'une économie zéro-CO₂ est nécessaire pour limiter autant que possible les méfaits du changement climatique.*

Selon le Groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du changement climatique, les émissions mondiales de CO₂ devraient être réduites de 50 à 85 % par rapport à leur niveau de 2000 de façon à limiter l'élévation de la température mondiale à 2-2,4 degrés par rapport à l'époque pré-industrielle. Une réduction de 80 % de l'ensemble des émissions américaines de CO₂ d'ici 2050 serait parfaitement insuffisante pour parvenir à ce but puisque les émissions américaines seraient encore de 2,8 tonnes par personne.

Une norme mondiale des émissions à cette hauteur maintiendrait les émissions de CO₂ dans le monde à un niveau presque aussi élevé qu'en l'an 2000.³ En revanche, une norme mondiale des émissions approximativement égale par personne en 2050, créée conjointement à une réduction mondiale de 50 pour cent des émissions, se traduirait par une réduction d'environ 88 % des émissions américaines. Une réduction de 85 % des émissions mondiales de CO₂ correspond à une réduction de 96 % pour les États-Unis. Une allocation des émissions sur la base de l'historique des contributions cumulées serait encore plus stricte.

Un objectif zéro-CO₂ pour les États-Unis, défini comme étant faiblement supérieur ou inférieur à zéro par rapport à 2000, est à la fois nécessaire et prudent pour la protection du climat mondial. Il est aussi atteignable à un coût raisonnable.

Conclusion 2 : Un plafond strict sur les émissions de CO₂ (c'est-à-dire une limite fixe des émissions qui baisse d'année en année jusqu'à atteindre zéro) offrirait aux gros utilisateurs de combustibles fossiles une méthode souple pour éliminer les émissions de CO₂. Toutefois, des quotas d'émissions gratuits, des mécanismes de compensation qui autorisent des émissions grâce à des réductions réalisées par des tierces parties⁴, ou un système international d'échanges de quotas, notamment avec des pays en développement qui ne sont pas soumis à des plafonds de CO₂, affaibliraient le système et iraient à l'encontre de sa finalité. Une limite physique basée sur des mesures, avec une mise en œuvre adaptée, doit être mise en place.

Un plafond fixe sur les émissions de CO₂ est recommandé pour les plus gros utilisateurs de combustibles fossiles, définis par une utilisation annuelle de 100 milliards d'unités thermiques britanniques (Btu) ou plus, ce qui correspond à l'énergie livrée à environ 1 000 ménages. À ce niveau, les utilisateurs disposent des moyens financiers nécessaires pour suivre le marché, effectuer des achats et des ventes, et évaluer le moment où il est plus intéressant d'investir dans des technologies de réduction du CO₂ ou d'acheter des crédits. Ceci permettrait de couvrir environ les deux tiers de la consommation en combustibles fossiles. Les véhicules particuliers, l'utilisation de gaz et de fuel pour le chauffage dans le secteur résidentiel et du petit tertiaire, et d'autres utilisations similaires à petite échelle, ne seraient pas soumis à ce plafond.

Dans ces domaines, la transition serait assurée par des normes d'efficacité énergétique, des normes sur les émissions de gaz d'échappement, et d'autres définies et mises en œuvre par les autorités fédérales, étatiques et locales. Cette étude n'envisage pas de taxes, sauf peut-être pour des véhicules neufs dont les performances énergétiques seraient très inférieures à la moyenne ou aux normes d'émissions. Le plafond fixe baisserait chaque année et passerait à zéro avant 2060.

Une accélération du rythme serait possible, en fonction de l'évolution de la technologie et des impacts sur le climat.

La vente de ces quotas d'émissions permettrait au gouvernement de faire rentrer annuellement des recettes de l'ordre de 30 à 50 milliards de dollars pendant la plus grande partie de la période, dans la mesure où le prix des quotas d'émissions de CO₂ aurait tendance à augmenter au fur et à mesure de la baisse de l'offre.

Ces recettes seraient utilisées pour faciliter la transition à tous les niveaux (local, étatique et fédéral) ainsi que pour des projets de démonstration et la recherche et développement.

Conclusion 3 : *Un secteur électrique américain fiable, sans émissions de CO₂, peut être atteint sans recours à l'énergie nucléaire ou aux combustibles fossiles.*

Les États-Unis disposent en termes d'énergies renouvelables d'un vaste potentiel pratiquement inexploité. Les ressources éoliennes disponibles dans 12 États du Middle West et des Rocheuses sont équivalentes à 2,5 fois la production électrique totale des États-Unis.

Le Dakota du Nord, le Texas, le Kansas, le Dakota du Sud, le Montana et le Nebraska disposent *chacun* d'un potentiel éolien supérieur à l'électricité produite par l'ensemble des 103 centrales nucléaires américaines.

Avec seulement un pour cent de la superficie des États-Unis, les ressources en énergie solaire seraient environ trois fois supérieures à celles de l'énergie éolienne, si la production était concentrée dans les zones à très fort ensoleillement dans le Sud-Ouest et l'Ouest.

Aux États-Unis, les parcs de stationnements et les toits des bâtiments à eux seuls pourraient fournir la plus grande partie de l'approvisionnement électrique du pays. Ceci a également l'avantage d'éviter de recourir à un développement des lignes de transport d'électricité, même si un certain renforcement de l'infrastructure de distribution peut s'avérer nécessaire. Un premier pas a été fait. La Marine américaine possède une installation de 750 kW dans l'un de ses parkings à San Diego qui offre des places ombragées pour plus de 400 véhicules, avec beaucoup d'espace libre en réserve pour un développement de la production électrique.

Figure 1 : Installation solaire photovoltaïque de 750 kW sur un parking de la Marine américaine près de San Diego



Avec l'aimable autorisation de PowerLight Corporation

L'énergie éolienne est d'ores et déjà plus économique que l'énergie nucléaire. Au cours des deux dernières années, le coût des cellules photovoltaïques a baissé jusqu'au point où des installations de taille moyenne, comme celle qui apparaît sur la photo de couverture, sont rentables dans les zones ensoleillées dans la mesure où elles fournissent de l'électricité essentiellement pendant les heures de pointe.

Le principal problème avec l'énergie éolienne et l'énergie solaire est leur caractère intermittent. Il peut être réduit par une intégration de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire au niveau du réseau ; l'énergie éolienne est, par exemple, plus abondante la nuit. La diversité géographique réduit aussi l'intermittence de chaque source et la combinaison des deux. L'intégration dans le réseau de ces deux sources jusqu'à environ 15 pour cent de la production totale (pratiquement la contribution de l'électricité nucléaire aujourd'hui) peut être faite sans coût important ou difficulté technique majeure avec la technologie disponible, sous réserve de prendre les mesures d'optimisation adaptées.

Le solaire et l'éolien devraient également être associés à l'hydraulique, cette dernière étant utilisée quand la production éolienne est faible ou nulle. Ceci existe déjà dans le Nord-Ouest. Les conflits avec les apports d'eau nécessaires à la gestion de la faune piscicole peuvent être résolus en combinant ces trois sources avec une capacité de réserve au gaz naturel. Le coût élevé du gaz naturel en fait un choix rentable pour une utilisation dans des centrales à cycle combiné comme capacité de réserve et réserve tournante pour l'éolien plutôt que pour une production en base ou demi-base. En d'autres termes, étant donné le prix élevé du gaz naturel, la mise en veille de ces centrales pendant une partie du temps peut être économique et elles peuvent venir en complément de l'éolien. L'air comprimé peut aussi être utilisé pour le stockage de l'énergie en combinaison avec ces différentes sources. Aucune nouvelle technologie n'est nécessaire pour ces méthodes de production ou de stockage.

La production électrique en base peut être fournie par des centrales géothermiques et à biomasse. La demi-base en soirée peut être assurée par des centrales thermiques solaires qui disposent d'une capacité intégrée de stockage thermique de quelques heures.

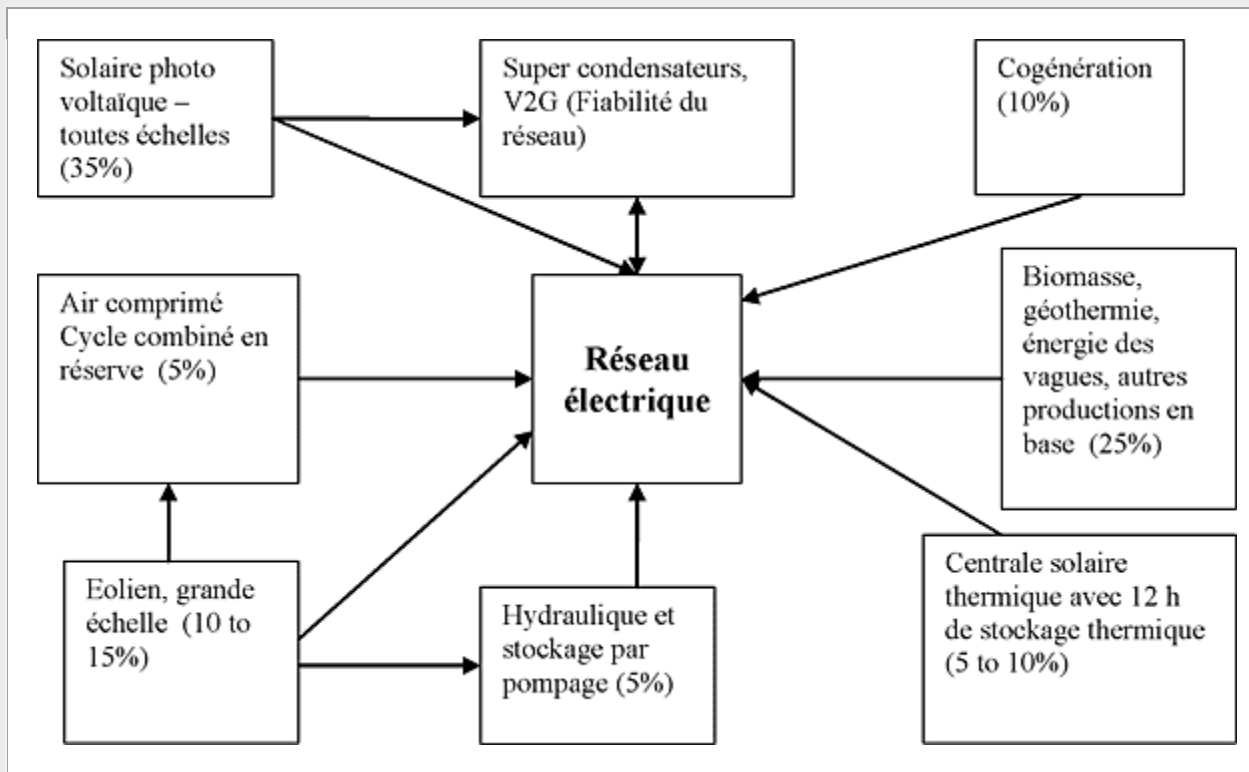
Finalement, de nouvelles batteries peuvent alimenter des véhicules hybrides plug-in et des véhicules électriques appartenant à des flottes ou garés dans de grands parkings pour assurer un stockage relativement bon marché. Des batteries au lithium-ion basées sur la nanotechnologie, dont Altairnano a commencé la production, peuvent être déchargées complètement un nombre de fois bien supérieur à celui qui est nécessaire à un véhicule au cours de sa durée de vie (10 000 à 15 000 fois à comparer à environ 2 000 fois).

Dans la mesure où les performances de la batterie excèdent largement les nombres de cycles de charge et décharge nécessaires au véhicule lui-même, les batteries de véhicule pourraient devenir une source très bon marché de stockage d'électricité qui peut être utilisée dans un système véhicule à réseau (vehicle-to-grid – V2G). Dans un tel système, des voitures garées seraient raccordées au réseau, et chargées et déchargées en fonction de l'état des besoins du réseau et de la charge de la batterie du véhicule. Les technologies de communication permettant de réaliser ce système avec des câbles ou des dispositifs sans fil sont déjà parvenues à une phase commerciale. Une petite fraction du nombre total des véhicules routiers (quelques pour cent) pourrait assurer une capacité de réserve suffisante pour stabiliser un réseau électrique bien conçu basé sur des sources d'énergie renouvelable (y compris biomasse et géothermie).

La figure 2 ci-dessous montre une configuration possible du réseau électrique. Une importante capacité de réserve devient disponible. Ceci permet à une combinaison d'électricité éolienne et solaire de fournir la moitié ou plus de l'électricité sans nuire à

sa fiabilité. La plus grosse partie de la capacité de réserve serait assurée par un stockage stationnaire et/ou du V2G, et par des centrales à cycle combiné dont le combustible est issu de la biomasse. Un stockage thermique lié à des centrales thermiques solaires offrirait un stockage supplémentaire. L'utilisation de l'énergie hydraulique serait optimisée en fonction des autres sources de stockage et de réserve. L'énergie éolienne peut aussi être complétée par un stockage d'air comprimé, ce dernier étant utilisé pour réduire la consommation de méthane dans des centrales à cycle combiné.

Figure 2 : Une configuration future possible pour un réseau électrique américain, sans charbon ou énergie nucléaire, en 2050



Avec une combinaison de technologies judicieuses, il est probable que même l'utilisation du charbon pourra être éliminée, ainsi que celle de l'électricité nucléaire. Toutefois, nous sommes conscients du fait que les technologies particulières qui sont à la pointe du progrès aujourd'hui ne se développent pas comme prévu actuellement. Il paraît donc prudent d'avoir une stratégie de repli. Le dioxyde de carbone des centrales à charbon peut être capturé à un coût modéré si ces centrales fonctionnent avec une technologie appelée cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI). La

capture et séquestration du carbone peuvent aussi être nécessaire pour retirer le CO₂ de l’atmosphère à l’aide de la biomasse, si cela s’avérait nécessaire.⁵

Les tableaux 1 et 2 donnent des informations détaillées et une estimation des échéances technologiques, ainsi que quelques remarques sur les coûts pour les composantes essentielles du scénario de référence de l’IEER. Le scénario de référence de l’IEER donne une description des combinaisons globales de technologies et de mesures politiques qui permettraient de parvenir à une économie zéro-CO₂ sans aucun combustible fossile ni énergie nucléaire d’ici 2050. Nous recommandons une interdiction des nouvelles centrales à charbon sans capture du carbone parce que la construction de nouvelles centrales à ce stade induirait des pressions en faveur de l’augmentation des quotas d’émissions de CO₂ et/ou des coûts supérieurs pour la capture du CO₂ ultérieurement.

Tableau 1 : Feuille de route technologique jusqu’en 2025 – Technologies de production et de stockage

Technologie	État d’avancement	Déployable pour une utilisation à grande échelle	Prochaines étapes	Coût de la réduction des émissions de carbonnes ; obstacles; commentaires
Solaire photovoltaïque – taille moyenne	Stade pratiquement commercial avec la tarification horo-saisonnière	2010 à 2015	Commandes du secteur industriel et du gouvernement ; tarification horo-saisonnière	10 à 30 \$ la tonne ; pas de stockage ; absence de grandes usines de fabrication de panneaux PV (~1 GW/an/installation) ; un certain développement des techniques de fabrication est nécessaire.
Solaire photovoltaïque – grande installation	Presque au stade commercial	2015 à 2020	Démonstration à grande échelle avec une infrastructure de transport ~5 000 MW vers 2015-2020	20 à 50 \$ la tonne ; pas de stockage ; une infrastructure de transport peut être nécessaire dans certains cas.
Centrales solaires thermiques à concentration	Presque au stade commercial ; nécessité d’une démonstration du stockage	2015 à 2020	~3 000 à 5 000 MW sont nécessaires pour stimuler la demande et faire la démonstration d’un stockage de 12 heures, d’ici 2020	20 à 30 \$ la tonne dans le Sud-Ouest. La faiblesse de la demande est le principal problème.

Capture du CO ₂ par des micro-algues et production de combustible liquide	Technologie développée, installations pilotes en cours de construction	2015	Démonstrations à grande échelle — 1 000 à 2 000 MW d'ici 2012 ; stockage du CO ₂ pendant la nuit et installations pilotes de capture du CO ₂ pendant la journée, d'ici 2012. Mise en œuvre à grande échelle par la suite. Installations de démonstration pour la production de combustible liquide : 2008–2015	Prix nuls à négatifs pour des prix du pétrole au-dessus de 30 \$ la tonne environ pour la capture en journée ; la capture pendant la nuit reste à être définie. Potentiel de combustible liquide : 48 à 95 000 litres l'hectare (à comparer à 6 200 litres pour l'huile de palme).
Énergie éolienne : à grande échelle, à terre	Stade commercial	Déjà utilisée	Les problèmes liés aux infrastructures et aux règles de transport doivent être résolus ; optimisation du fonctionnement avec des centrales hydrauliques ou à cycle combiné au gaz naturel	Entre négatif et 46 \$ la tonne pour un fonctionnement avec une capacité de réserve à cycle combiné. Les zones très ventées ne sont pas proches des populations. Nécessité de développer les infrastructures de transport.
Solaire photovoltaïque – stockage intermédiaire	Les batteries perfectionnées et les supercondensateurs sont encore très coûteux	~2020	Démonstration d'un système véhicule-à-réseau (V2G) à l'aide d'un stockage fixe (supercondensateurs et batteries à nanotechnologie lithium-ion) – plusieurs installations sur parking ~1 MW	Une réduction par cinq du coût des supercondensateurs et des batteries au lithium-ion est nécessaire. Principaux problèmes : absence de fabrication à grande échelle et nécessité d'un certain développement de la technologie de fabrication.
Solaire photovoltaïque – à moyenne échelle avec système véhicule-à-réseau	Encore au stade de projet. Composantes technologiques disponibles. Nécessité d'une intégration	~2020 à 2025	D'ici 2015, plusieurs réalisations de démonstration de la technologie V2G de 5 000 à 10 000 véhicules	La technologie V2G pourrait réduire le coût du stockage de l'électricité PV de plusieurs cents à peut-être un cent par kWh.
Centrale à cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) à	Stade de la première démonstration	~2020	Installations pilotes et de taille moyenne (de quelques MW à 100 MW) avec différents	Production en base

biomasse			types de biomasse (micro-algues, plantes aquatiques), 2015 à 2020	
Biomasse aquatique à taux élevé de capture de l'énergie solaire	Expérience essentiellement dans le contexte du traitement des eaux usées ; quelques données sur des installations de laboratoire et pilote	~2020	2010 à 2015 évaluations en installations pilotes de la production de combustible liquide et de méthane avec et sans connexion avec le traitement des eaux usées	Peut être comparable à la production de biocombustibles par les micro-algues. 125 à 250 tonnes à l'hectare.
Géothermie roches chaudes	Concept démontré, le développement de la technologie reste à faire	2025 ?	Constructions d'installations pilotes et de démonstration : période 2015–2020	Production en base
Énergie des vagues	Concepts démontrés	2020 à 2025 ?	Installations pilotes et de démonstration nécessaires	Production en base possible
Hydrogène photolytique	Développement en laboratoire	Inconnu – peut-être 2020 ou 2025	Augmentation significative du financement de la R&D, avec pour objectif des installations pilotes en 2015	Possibilité de taux élevé de capture de l'énergie solaire. Pourrait jouer un rôle clé pour surmonter les difficultés liées à l'emprise foncière importante de la plupart des biocombustibles.
Hydrogène photo-électrochimique	Concept démontré, le développement de la technologie reste à faire	Peut-être 2020 ou 2025	Augmentation significative du financement de la R&D, avec pour objectif des installations pilotes en 2015	Taux élevé de capture de l'énergie solaire. Pourrait jouer un rôle clé pour surmonter les problèmes posés par les biocombustibles agricoles (notamment les résidus de cultures).
Batteries avancées	Batteries au lithium-ion à nanotechnologie ; début du stade commercial avec subventions	2015	Certification indépendante de la sécurité (2007?) ; usines de fabrication de grande taille	Fabrication à grande échelle pour réduire les coûts. Pourrait jouer un rôle clé dans l'obtention d'une technologie V2G à bas coût.
Séquestration du	Technologie	Inconnu. Peut	Essais d'étanchéité à	Pour une utilisation

carbone	démontrée dans un autre contexte que les centrales électriques	être 15 ou 20 ans	long terme. Projet de démonstration ~2015 à 2020	avec de la biomasse, plus une capacité de réserve, si du charbon est nécessaire.
Supercondensateurs	Stade commercial dans certaines applications mais pas pour un stockage d'énergie à grande échelle	2015 à 2020 ?	Essai de démonstration avec du solaire photovoltaïque à moyenne échelle. Démonstration avec des véhicules hybrides plug-in en complément du fonctionnement sur batterie pour une alimentation stop-and-start	Complète et teste la technologie V2G. Une réduction des quatre cinquièmes est nécessaire pour arriver à un prix d'environ ~50 \$/tonne de CO ₂ . Prix de CO ₂ inférieur avec une tarification horo-saisonnière.
Nanocondensateurs	Essais en laboratoire des concepts	Inconnu.	Finir le travail de laboratoire et démontrer la méthode	Offre la possibilité de réduire les coûts du stockage stationnaire de l'électricité et d'amener la technologie des supercondensateurs à l'étape suivante.
Production d'hydrogène électrolytique	Technologie démontrée	Dépend d'améliorations de l'efficacité et du développement des infrastructures	Nécessité d'une installation de démonstration avec des véhicules à hydrogène comprimé ~2015 à 2020	Peut-être utilisé conjointement avec de l'énergie éolienne hors pointe

Tableau 2 : Feuille de route technologique jusqu'en 2025 – Technologies de gestion de la demande

Technologie	État d'avancement	Déployable pour une utilisation à grande échelle	Prochaines étapes	Prix CO ₂ ; obstacles ; commentaires
Véhicules de transport de passagers économes à essence et diesel	Commercial jusqu'à ~5 litres au 100 km ou moins	En cours d'utilisation	Nécessité de normes d'efficacité	L'efficacité dépend du véhicule. Peut être très supérieure.

Véhicules hybrides plug-in	La technologie a été démontrée	2010	Normes d'efficacité énergétique, commandes de véhicules par les gouvernements et les entreprises	Il est nécessaire d'avoir une fabrication des batteries à grande échelle pour réduire le coût des batteries lithium-ion d'un facteur cinq environ.
Voitures électrique	Technologie démontrée pour une autonomie d'environ 300 km ; faible volume de production commerciale en 2007 (voitures de sport et camionnettes)	2015 à 2020	Essais de sécurité, infrastructure de recyclage pour les matériaux des batteries, commandes à grande échelle, démonstration solaire photovoltaïque-V2G	Un des éléments clés pour réduire le recours aux biocarburants et augmenter les composantes solaire et éolienne.
Véhicule à moteur à combustion interne à hydrogène	Technologie démontrée	Dépend du développement des infrastructures	Développement et essais de véhicules 10 000 psi (700 bar). Projet de démonstration.	
Biocarburants pour l'aviation	Différents carburants en cours d'essais	2020 ?	Développement des carburants, essais de sûreté, tests des émissions	
Carburant hydrogène aviation	La technologie a été démontrée	2030 ?	Conception de l'avion, essais de sûreté, démonstration des infrastructures	En association avec la production d'hydrogène solaire, pourrait réduire le recours aux biocarburants liquides.
Conception des bâtiments	Stade commercial, bien connu	Déjà utilisée	Normes de construction, diffusion des connaissances, suppression du hiatus économique entre les promoteurs et les utilisateurs des bâtiments	La consommation énergétique des bâtiments résidentiels et commerciaux par mètre carré peut être réduite de 60 à 80 % avec des technologies existantes et des méthodes connues. Prix du CO ₂ , de négatif à 50 \$ la tonne.
Pompes à chaleur géothermiques	Stade commercial	Déjà utilisées	Des normes de construction qui spécifient les performances permettront d'accroître son utilisation	Convient dans de nombreuses régions ; surtout pour les nouvelles constructions.

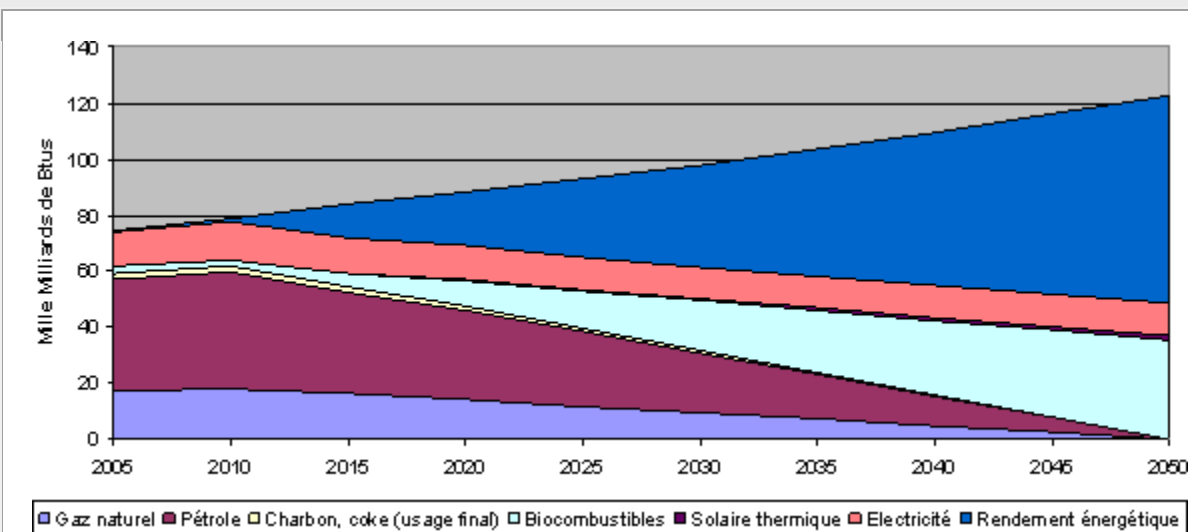
Cogénération chaleur et électricité (CHP), bâtiments commerciaux et industries	Stade commercial	Déjà utilisée	Des normes de performance sur les constructions et un plafond CO ₂ permettront d'en développer l'utilisation	Prix du CO ₂ négatif à <30 \$ la tonne dans de nombreuses situation
Microgénération	Semi-commerciale	Déjà utilisée	Des normes de performance sur les constructions permettront d'en développer l'utilisation	
Lampes fluorescentes compactes (LFC)	Stade commercial	Déjà utilisées	Nécessité de réglementations sur les appareils ménagers et les bâtiments	Prix de CO ₂ négatif. Une solution doit être trouvée à l'impact du mercure lors de l'élimination.
Éclairage hybride solaire à fibre optique et LFC .	Technologie démontrée ; test bêta en cours de réalisation dans des établissements commerciaux	2012 à 2015 ?	Commandes du secteur public et commercial	Les concentrateurs solaires concentrent la lumière à l'intérieur ; fonctionnent avec des CFL. Nécessité de diviser le coût par cinq
Secteur industriel : exemples d'approches technologiques et de gestion : alternatives à la distillation, gestion de circuit vapeur, cogénération, nouveaux matériaux, amélioration de la proportion de la production « bonne du premier coup » (first pass)	Développement continu des procédés	Divers	Un plafond ferme pour le CO ₂ avec des baisses annuelles assurées et sans quotas gratuits aboutira à une augmentation de l'efficacité énergétique.	Variable. De négatif jusqu'à peut-être 50 \$ par tonne, éventuellement plus dans certains cas. Il existe un important potentiel d'augmentations économiques de l'efficacité énergétique aux coûts actuels, dans la mesure où les coûts de l'énergie ont monté brusquement. Des réductions réussies de la consommation énergétique montrent que le coût global sera modeste, avec une éventuelle réduction dans le coût net des services énergétiques.

Une élimination complète du CO₂ pourrait intervenir dès 2040. L'élimination de l'énergie nucléaire pourrait aussi intervenir dans ce délai. L'élimination rapide des émissions de CO₂ et de l'énergie nucléaire dépend des avancées technologiques, par

exemple en ce qui concerne l'efficacité de la production solaire d'hydrogène. Si d'importants obstacles existent dans les hypothèses technologiques, par exemple si le système V2G ne peut être mis en place dans les délais envisagés ici (à grande échelle d'ici 15 à 20 ans), alors il peut être nécessaire de recourir à des technologies telles que la co-combustion du gaz naturel avec de la biomasse (ou même d'un peu de charbon avec de la biomasse) accompagnée d'une séquestration du CO₂. Dans ce cas, une économie zéro-CO₂ pourrait être retardée jusqu'à environ 2060.

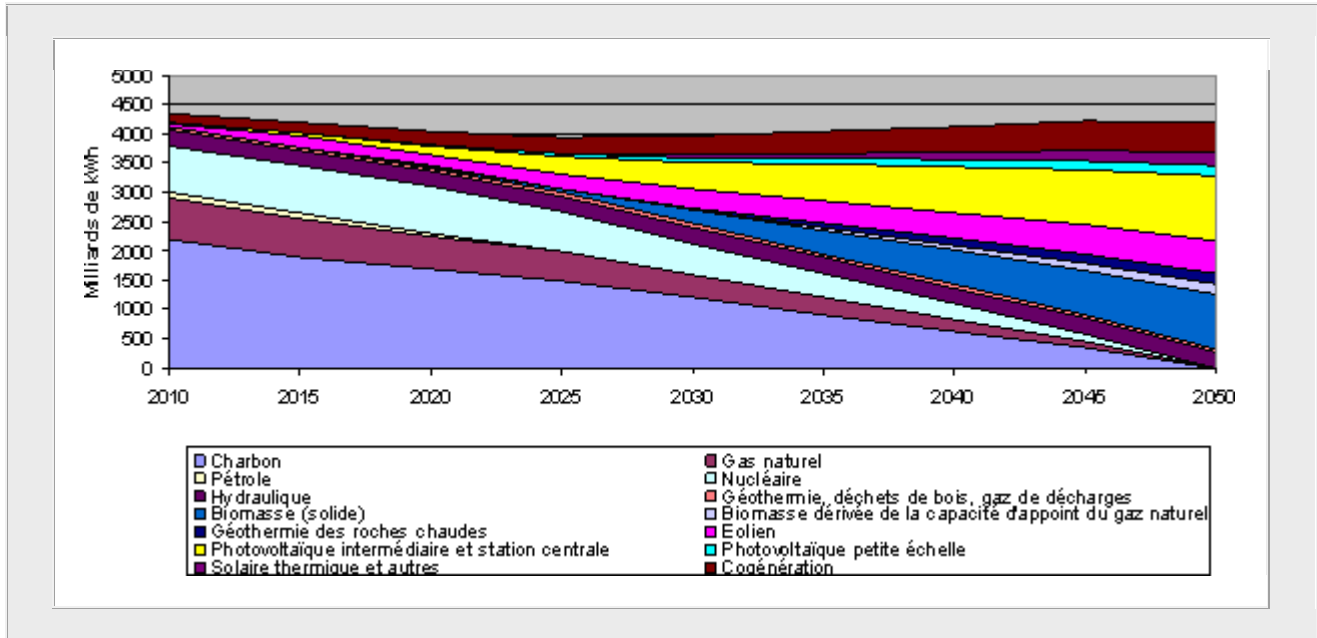
La figure 3 montre l'énergie fournie pour les utilisations finales dans le scénario de référence de l'IEER (les pertes de la production électrique et de la production des biocombustibles ne sont pas prises en compte), ce qui indique les grandes lignes de la montée en puissance des nouveaux combustibles et la disparition des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire. Elle fait également apparaître le rôle de l'efficacité énergétique par rapport à un scénario tendanciel. Le scénario de référence envisage une économie zéro-CO₂ et sans nucléaire d'ici 2050.

Figure 3 : Energie fournie : Scenario IEER de référence



La figure 4 indique la structure correspondante pour la production d'électricité. Les faibles baisses suivies d'augmentations traduisent l'essor plus rapide de l'efficacité que laisse prévoir l'introduction à grande échelle des véhicules électriques.

Figure 4 : Électricité fournie : Scenario IEER de référence



Conclusion 4 : L'utilisation de l'énergie nucléaire entraîne des risques de prolifération nucléaire, de terrorisme et d'accidents graves.

Elle exacerbe le problème des déchets nucléaires et perpétue au niveau du système énergétique des vulnérabilités et des insécurités qui sont évitables.

La technologie nucléaire industrielle est actuellement préconisée, notamment par le gouvernement américain, comme une manière de réduire les émissions de CO₂. Avec la Russie, les États-Unis mettent en avant un dispositif visant à limiter l'enrichissement de l'uranium et la séparation du plutonium (retraitement) à des fins civiles aux pays qui en disposent déjà. (Il s'agit des deux procédés permettant de produire des matières nucléaires utilisables pour la fabrication d'armes atomiques.) Il s'agit d'une tentative transparente visant à modifier le Traité de non-prolifération nucléaire (TNP) sans avoir à passer par le processus de travail avec les signataires pour l'amender.

Cette initiative va affaiblir ce traité qui donne aux parties non nucléaires un « droit inaliénable » à la technologie nucléaire civile. Il est de toutes façons bien peu probable que les États non détenteurs d'armes nucléaires soient d'accord avec les restrictions proposées.

Il n'est pas difficile de discerner que l'intérêt croissant pour l'énergie nucléaire constitue au moins partiellement une stratégie visant à acquérir une capacité nucléaire militaire. Ainsi, le Conseil de coopération du Golfe (Bahreïn, Koweït, Oman, Qatar,

Arabie saoudite et Émirats arabes unis), faisant allusion à l'Iran et Israël, a déclaré qu'il allait ouvertement acquérir la technologie nucléaire civile.

La presse rapporte qu'en faisant cette annonce, le ministre des Affaires étrangères saoudien, le Prince Saud Al-Faisal, a précisé : « Ce n'est pas une menace [...] Nous le faisons ouvertement. » Il a également qualifié le réacteur nucléaire d'Israël, utilisé pour produire le plutonium de son arsenal nucléaire, de « péché originel ». Dans le même temps, il a appelé la région à être une zone sans nucléaire.⁶

L'intérêt pour le retraitement civil pourrait se développer du fait des politiques du gouvernement américain. Les problèmes du retraitement sont déjà décourageants. Par exemple, la Corée du Nord a utilisé une centrale nucléaire civile et une usine de retraitement pour obtenir le plutonium nécessaire à son arsenal nucléaire.

Outre les États dotés d'armes nucléaires, environ une trentaine de pays, dont l'Iran, le Japon, le Brésil, l'Argentine, l'Égypte, Taïwan, la Corée du Sud et la Turquie, possèdent la capacité technologique de fabriquer des armes nucléaires. Il est crucial que les États-Unis prêchent par l'exemple et parviennent aux nécessaires réductions des émissions de CO₂ sans recourir à l'énergie nucléaire. Un recours accru à l'énergie nucléaire transformerait le difficile problème de la prolifération nucléaire aujourd'hui en un casse-tête pratiquement insoluble.

Le nombre actuel des centrales et des infrastructures nucléaires a déjà créé des tensions entre la non-prolifération et les droits d'acquérir la technologie nucléaire dont disposent les pays dans le cadre du TNP. Augmenter leur nombre exigerait d'autres usines d'enrichissement de l'uranium, alors qu'une seule de ces installations en Iran a généré des tensions politico-militaires au niveau mondial jusqu'au point où cela représente un facteur majeur dans les fluctuations des cours du marché spot du brut. De plus, il existe des risques de terrorisme, dans la mesure où les centrales sont des cibles annoncées par les terroristes. Il semble par conséquent difficile de préconiser une augmentation du nombre des cibles.

Aucune solution n'a jusqu'ici été trouvée au problème des déchets nucléaires. Augmenter le nombre des centrales nucléaires ne ferait qu'aggraver le problème. Aux États-Unis, cela obligerait probablement à créer un second site de stockage, voire un troisième, alors que le premier, à Yucca Mountain au Nevada, connaît de sérieuses difficultés. Jusqu'à présent, aucun pays n'a été capable de résoudre les graves problèmes à long terme, au niveau de l'environnement, de la santé et de la sûreté, associés à l'évacuation du combustible usé ou des déchets de haute activité, même si les évaluations officielles du risque de dommages résultant de l'exposition à la radioactivité continuent de croître.⁷

Enfin, depuis le début des années 1980, les milieux financiers ont été, et restent, sceptiques vis-à-vis de l'énergie nucléaire du fait des coûts et des risques associés. C'est pourquoi, plus d'un demi-siècle après que le président de la Commission américaine de l'énergie atomique de l'époque, Lewis Strauss, a proclamé que l'énergie nucléaire serait « trop bon marché pour être comptabilisée », l'industrie continue de se tourner vers le gouvernement pour obtenir des garanties de prêts et autres subventions. La situation n'est pas meilleure du côté des assurances. L'assurance très limitée qui existe est très loin des estimations officielles des dommages qui résulteraient des accidents les plus graves ; elle est presque totalement financée par le gouvernement.

Conclusion 5 : L'utilisation de technologies et d'architectures à haut rendement énergétique, généralement disponibles aujourd'hui, peut grandement faciliter la transition vers une économie zéro-CO₂ et réduire son coût. Une augmentation annuelle de deux pour cent de l'efficacité par unité de produit national brut, par rapport aux tendances récentes, entraînerait une baisse d'un pour cent de la consommation énergétique, tout en assurant une croissance annuelle de trois pour cent du PIB. C'est tout à fait à la portée des performances technologiques disponibles.

Avant la première crise de l'énergie en 1973, on estimait généralement que la croissance de la consommation énergétique et la croissance économique exprimée par le produit intérieur brut (PIB), suivaient la même courbe. Mais peu après, le paysage énergétique américain a radicalement changé et, pendant une décennie, on est parvenu à une croissance économique sans croissance de l'énergie.

Depuis le milieu des années 1990, le rythme de la croissance énergétique a été inférieur d'environ deux pour cent à celui de la progression du PIB, malgré l'absence de politiques nationales visant à augmenter l'efficacité énergétique. Par exemple, avec les techniques actuelles, on peut construire des locaux résidentiels et commerciaux qui consomment entre un tiers et un dixième de la consommation énergétique moyenne actuelle par mètre carré (aujourd'hui). On peut remarquer, également, que la consommation énergétique industrielle des États-Unis est restée à peu près la même depuis le milieu des années 1970 même si la production a augmenté.

Nos recherches révèlent que la consommation énergétique finale annuelle (c'est-à-dire, en excluant les pertes d'énergie lors de la production d'électricité et de biocombustibles) peut être réduite d'environ un pour cent par an tout en maintenant la croissance économique prévue dans les projections officielles sur l'énergie.

Conclusion 6 : Les biocombustibles, dans leur acception la plus large, peuvent jouer un rôle crucial dans la transition vers une économie zéro-CO₂, sans effets secondaires graves sur l'environnement ou, au contraire, ils peuvent entraîner des

dommages collatéraux considérables ou même être très nuisibles pour l'environnement et augmenter les émissions de gaz à effet de serre. Le résultat dépendra essentiellement des choix politiques, des mesures incitatives et de la recherche et développement publiques et privés.

Le biodiesel et l'éthanol produits à partir de cultures vivrières peuvent générer, et génèrent effectivement, des nuisances sociales, économiques et écologiques, notamment des prix élevés pour l'alimentation, une pression foncière sur les terres utilisées par les pauvres dans les pays en développement pour une agriculture ou un élevage de subsistance, et des émissions de gaz à effet de serre qui annulent en bonne partie ou entièrement l'effet de l'utilisation de l'énergie solaire contenue dans les biocombustibles. Même s'ils peuvent réduire les importations d'hydrocarbures, l'éthanol issu du maïs et le biodiesel provenant de l'huile de palme démontrent que ces deux biocombustibles ont déjà créé ces types de problèmes, même avec des niveaux de production modestes.

Par exemple, au nom des énergies renouvelables, le recours à la production d'huile de palme pour une utilisation dans le biodiesel européen a aggravé le problème des émissions de CO₂ suite aux incendies dans les tourbières qui sont actuellement détruites en Indonésie (là où la majeure partie de l'huile de palme est produite) pour y cultiver les palmiers. L'augmentation rapide de la production de l'éthanol issu du maïs est déjà partiellement responsable de l'augmentation des prix des tortillas au Mexique. En outre, même si l'éthanol issu du maïs peut contribuer à réduire les importations d'hydrocarbures, son impact sur la réduction des gaz à effet de serre ne peut-être, au mieux que limité du fait de l'intensité énergétique de la culture du maïs et de la production de l'éthanol, et de l'utilisation de grandes quantités d'engrais artificiels qui émettent d'autres gaz à effet de serre (particulièrement d'oxyde nitreux). Toutes les subventions en faveur des combustibles dérivés des cultures vivrières devraient être supprimées.

En revanche, une biomasse qui capture très efficacement l'énergie solaire (environ cinq pour cent), comme les micro-algues cultivées dans un environnement riche en CO₂, peut constituer une bonne partie de l'approvisionnement en énergie aussi bien pour la production d'électricité que pour la fourniture de combustibles liquides et gazeux pour le transport et l'industrie.

Il a été démontré que les micro-algues peuvent capturer plus de 80 pour cent des émissions de CO₂ des centrales thermiques pendant la journée et peuvent être utilisées pour produire annuellement jusqu'à 95 000 litres de carburant liquide à l'hectare. Certaines plantes aquatiques, comme les jacinthes d'eau, possèdent la même efficacité pour la capture de l'énergie solaire, et peuvent être cultivées dans des eaux usées dans le cadre de systèmes combinant traitement de l'eau et production d'énergie.

Les figures 5 et 6 donnent deux exemples déterminants de biomasse qui ont un potentiel de capture de l'énergie solaire d'environ 5 pour cent, soit environ dix fois celui du maïs, en tenant compte du grain et des résidus de récolte. La centrale à charbon NRG en Louisiane, est actuellement utilisée par GreenFuel Technologies Corporation pour des essais de terrain. La centrale est le site potentiel d'un système de bioréacteur à algues de taille commerciale destiné à recycler les émissions de CO₂ de l'installation en biodiesel ou en éthanol.

Figure 5 : Bioréacteur à algues de démonstration en fonctionnement près d'une centrale à charbon en Louisiane



Avec l'aimable autorisation de Greenfuel Technologies Corporation

Des jacinthes d'eau ont été utilisées pour dépolluer des eaux usées parce qu'elles poussent rapidement et absorbent de grandes quantités de nutriments. Leur productivité dans des climats tropicaux ou subtropicaux est comparable à celle des micro-algues : jusqu'à 250 tonnes par hectare et par an. Elles peuvent être utilisées comme matière première pour la production de combustibles liquides ou gazeux.

Figure 6 : La production de jacinthes d'eau peut atteindre 250 tonnes à l'hectare dans les

climats chauds



Avec l'aimable autorisation du Centre des plantes aquatiques et invasives, Institut de l'alimentation et des sciences agricoles, Université de Floride

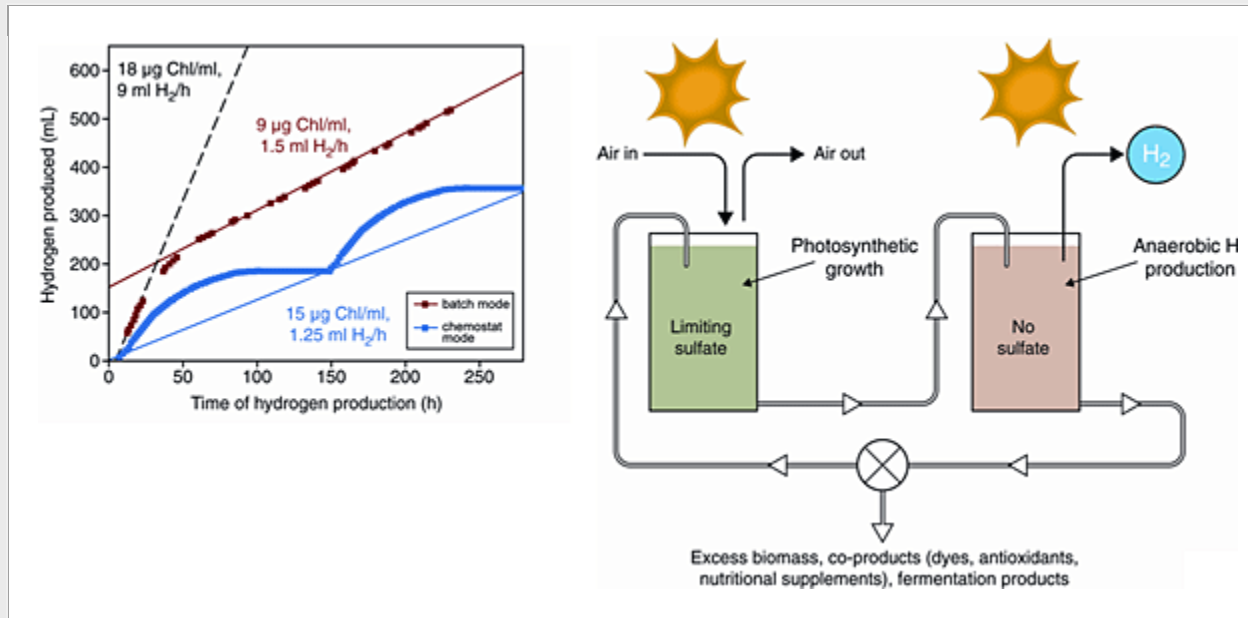
Les herbes de prairie n'offrent qu'une productivité moyenne, mais elles peuvent être cultivées sur des terres marginales de façon à permettre un stockage du carbone dans le sol. Cette méthode peut donc être utilisée aussi bien pour une production renouvelable de combustible que pour enlever du CO₂ de l'atmosphère.

Enfin, l'énergie solaire peut être utilisée pour produire de l'hydrogène ; cette voie pourrait être très prometteuse pour une transition vers l'hydrogène comme importante source d'énergie. Parmi les techniques figurent la production photo-électrochimique de l'hydrogène avec des équipements très comparables à des cellules photovoltaïques,

la séparation de l'hydrogène et de l'oxygène de l'eau à haute température grâce à l'énergie solaire, et la conversion de la biomasse en monoxyde de carbone et hydrogène dans une usine de gazéification. Des algues adaptées au sein d'un environnement parfaitement contrôlé et une fermentation de la biomasse peuvent aussi être utilisées pour produire de l'hydrogène. Certaines méthodes permettent de produire simultanément de l'énergie, de la nourriture et des produits pharmaceutiques. Les avancées ont été beaucoup plus lentes qu'elles auraient dû l'être du fait de l'absence de financement.

La figure 7 montre une production directe d'hydrogène à partir de la lumière du soleil à partir d'algues privées de soufre.

Figure 7 : Ce schéma/graphique a été conçu pour le National Renewable Energy Laboratory pour le Département à l'énergie des Etats-Unis



Note : En mode batch la production est arrêtée périodiquement pour renouveler les nutriments. Dans le mode « chémostat » les nutriments sont apportées en permanence pour maintenir la production. « Chl » signifie chlorophylle.

Conclusion 7 : Une bonne partie de la réduction des émissions de CO₂ peut être obtenue sans aucune pénalité de coût (comme, par exemple, pour l'éclairage et les réfrigérateurs de basse consommation). Le coût de l'élimination du reste des émissions de CO₂ issues de l'utilisation des combustibles fossiles devrait se situer entre 10 et 30 \$ par tonne de CO₂.

Le tableau 3 fait apparaître les coûts estimés pour l'élimination du CO₂ du secteur électrique en utilisant différentes méthodes. Il s'appuie sur les coûts de l'énergie en 2004. En adoptant les prix 2007 (environ 8 \$ par million de Btu de gaz naturel et presque 9 cents par kilowatt-heure (kWh) d'électricité, en moyenne de l'ensemble de tous les secteurs) les coûts seraient inférieurs.

Tableau 3 : Synthèse des coûts de réduction du CO₂ (et prix implicite des quotas d'émissions de CO₂) – Secteur électrique (à partir des coûts de l'énergie de 2004)

Source de CO ₂ :	Méthode de réduction	Échéance	Coût en \$ par tonne de CO ₂	Commentaires
Charbon pulvérisé	Énergie éolienne hors pointe	Court terme	De quelques dollars à 15 \$	Sur la base du coût marginal hors pointe du charbon
Charbon pulvérisé	Capture par micro-algues	Court et moyen terme	Zéro à négatif	En supposant un prix du pétrole >30 \$ le baril.
Charbon pulvérisé	Éolien avec capacité de réserve au gaz naturel	Moyen et long terme	De négatif à 46 \$	Centrale à cycle combiné mise en attente pour assurer une capacité de réserve. Coût le plus élevé au prix du gaz le plus bas : 4 \$ par million de Btu.
Charbon pulvérisé	Énergie nucléaire	Moyen à long terme	20 à 50 \$	Vraisemblablement non rentable comparé à l'éolien avec une capacité de réserve au gaz naturel
Charbon pulvérisé	Cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) avec séquestration	À long terme	10 à 40 \$ ou plus	De nombreuses incertitudes sur l'estimation actuellement. Le développement de la technologie reste à effectuer.
Composante d'éolien avec capacité de réserve au gaz naturel	Véhicule-à-réseau électrique (V2G)	Long terme	Inférieur à 26 \$	Le développement de la technologie reste à effectuer. Estimation incertaine. Prix à long terme du gaz naturel : 6,50 \$ par million de Btu ou plus.

Remarques :

1. Rendement thermique pour le charbon pulvérisé = 10 000 Btu/kWh ; pour un cycle combiné au gaz naturel = 7 000 Btu/kWh.
2. Coûts de l'électricité éolienne = 5 cents par kWh ; charbon pulvérisé = 4 cents par kWh ; nucléaire = 6 à 9 cents par kWh.
3. Coûts du pétrole 30 \$ du baril ou plus.
4. Les coûts du CO₂ liés aux catégories comportant de l'éolien peuvent être abaissés par un déploiement optimisé du solaire et de l'éolien ensemble/associés.

En outre, l'impact des augmentations des coûts des réductions des émissions de CO₂ sur le coût total des services énergétiques est suffisamment bas pour que la part globale du PIB consacrée à ces services reste au niveau actuel d'environ 8 %, ou peut-être moins. Elle a varié essentiellement entre 8 et 14 pour cent depuis 1970, atteignant son maximum en 1980. Elle a baissé brièvement jusqu'à environ 6 pour cent à la fin des années 1990 quand les cours du pétrole ont chuté brusquement, atteignant un minimum de 12 \$ le baril en 1998.

Le Tableau 4 montre les coûts d'énergie et d'investissements annuels totaux estimés pour les secteurs résidentiel et commercial en terme d'impact sur le PIB. Le scénario de référence de l'IEER prend en compte une réduction de la consommation énergétique par logement et par mètre carré, les investissements plus élevés nécessaires, et les prix de l'électricité et des combustibles prévus à un niveau quelque peu supérieur. L'impact net estimé sur le PIB pour la réduction de la consommation énergétique du secteur résidentiel et tertiaire par des améliorations de l'efficacité énergétique et pour une reconversion totale aux sources d'énergie renouvelable reste compris dans la plage d'incertitude de calcul .

Tableau 4 : Coûts de l'énergie et des investissements annuels pour les secteurs Résidentiel (R) et Tertiaire (T) en 2050, en milliards de dollars constants 2005

	Catégorie Scénario de référence IEER	Scénario tendanciel
R + T Électricité	326 \$	442 \$
R + T Combustible	150 \$	247 \$
<i>Sous-total coût de l'énergie</i>	476 \$	689 \$
Investissement annuel supplémentaire pour l'efficacité énergétique	205 \$	0 \$
Montant total sur la base du PIB (arrondi)	681 \$	689 \$
<i>PIB en 2050</i>	40 000 \$	40 000 \$
Fraction du PIB : services énergétiques secteurs résidentiel et tertiaire	1,70%	1,72%

Remarques :

1. Prix tendanciels (BAU) pour le combustible et l'électricité : environ 12 \$ par million de Btu et 9,6 cents par kWh. Prix IEER : 20 \$ par million de Btu et 14 cents par kWh respectivement. Le prix tendanciel de l'électricité date de janvier 2006.

2. Investissements supplémentaires pour l'efficacité énergétique : Résidences existantes : 20 000 \$ par résidence à chaque fois ; supposé se passer pour un tiers des ventes de bâtiments existants entre 2010 et 2050 ; neuf = 10 \$ par pied carré (env. 100 \$ par mètre carré, 20 000 \$ par maison, coût supplémentaire d'une maison certifiée LED) ; plus

le coût de remplacement des appareils électroménagers tous les 15 ans avec les modèles plus perfectionnés du moment. Les investissements pour le chauffage thermique solaire, la cogénération et les pompes à chaleur géothermiques s'ajoutent à ces chiffres en proportion des surfaces résidentielles qui les utilisent. Le sigle LED correspond à *Leadership in Energy and Environmental Design* ; c'est un programme de certification des bâtiments.

3. Investissements pour l'efficacité énergétique : 10 \$ par pied carré ; c'est plus que les exemples d'investissements LED au niveau platinum. Les investissements pour le chauffage thermique solaire, la cogénération et les pompes à chaleur géothermiques ont été ajoutés à ces chiffres.

4. PIB = dépenses de consommation + investissements + dépenses publiques (sur les biens et services) + exportations – importations.

La fraction du PIB consacrée aux services énergétiques dans tous les secteurs devrait se maintenir à environ 8 % ou moins selon le scénario de référence de l'IEER. Pour un particulier qui vient d'acquérir un nouveau logement, l'augmentation nette des coûts, compte tenu de l'augmentation des remboursements de prêts, se situera entre 20 et 100 \$ par mois ; ce dernier chiffre représente moins de 0,7 pour cent du revenu moyen par ménage prévu pour 2050.

Conclusion 8 : La transition vers un système zéro-CO₂ peut se faire de façon compatible avec le développement économique local dans des régions qui produisent maintenant des combustibles fossiles.

Aujourd'hui une grande partie des combustibles fossiles sont produits dans la région des Appalaches, dans le Sud-est et l'Est, et dans certaines parties du Middle-west et des États des Rocheuses. Ces régions sont également bien pourvues en ce qui concerne les principales énergies renouvelables, le solaire et l'éolien.

Les politiques aux niveaux local, étatique et fédéral destinées à aider les travailleurs et les communautés locales dans leur transition vers de nouvelles activités industrielles, apparaissent donc possibles sans les mouvements importants de populations ou d'autres événements déstabilisateurs qui se sont manifestés dans les États-Unis d'après-guerre. Il est reconnu qu'une bonne partie de ces migrations ont été dues à la dislocation et à la fermeture d'industrie, avec comme conséquence des épreuves importantes pour les travailleurs et les communautés locales. Une partie des ressources obtenues par la vente des quotas de CO₂ devrait être consacrée à la réduction de ces difficultés. Par exemple, l'utilisation des technologies de capture du CO₂, notamment la capture par micro-algues du CO₂ dans les centrales à combustibles fossiles existantes, peut créer de nouvelles activités industrielles et de nouveaux emplois dans les régions mêmes où l'arrêt de l'utilisation des combustibles fossiles aurait l'impact économique négatif le plus important.

Des politiques et des orientations publiques des ressources financières peuvent aider à la création de nouveaux emplois bien payés dans le secteur de l'énergie.

Synthèse des Principales Conclusions

- 1) Il est nécessaire d'avoir pour objectif une économie zéro CO₂ pour limiter autant que possible les dommages du changement climatique.
- 2) Un plafond strict sur les émissions de CO₂ (c'est-à-dire une limite fixe sur les émissions, qui baisse d'année en année jusqu'à atteindre zéro) offrirait aux gros utilisateurs de combustibles fossiles une méthode souple pour éliminer les émissions de CO₂. Par contre, des quotas d'émissions gratuits, des mécanismes de compensation qui permettent des émissions grâce à des réductions réalisées par des tierces parties, ou la négociation internationale de quotas, notamment avec des pays en développement qui ne sont pas soumis à des plafonds de CO₂, affaiblirait le système et irait à l'encontre de sa finalité. Une limite physique basée sur des mesures, soumise à une vérification adaptée, doit être mise en place.
- 3) Un secteur électrique américain fiable sans émissions de CO₂ peut être atteint sans recours à l'énergie nucléaire ou aux combustibles fossiles.
- 4) L'utilisation de l'énergie nucléaire entraîne des risques de prolifération nucléaire, de terrorisme et d'accidents graves. Elle exacerbe le problème des déchets nucléaires et perpétue pour le système énergétique des vulnérabilités et des insécurités qui sont évitables.
- 5) L'utilisation de technologies et d'architectures à haut rendement énergétique, généralement disponibles aujourd'hui, peut grandement faciliter la transition vers une économie zéro-CO₂ et réduire son coût. Une augmentation annuelle de deux pour cent de l'efficacité par unité de produit national brut, par rapport aux tendances récentes, entraînerait une baisse d'un pour cent de la consommation énergétique, tout en assurant une croissance de trois pour cent du PNB. C'est tout à fait à la portée des performances technologiques disponibles.
- 6) Les biocombustibles, dans leur acception la plus large, peuvent jouer un rôle crucial dans la transition vers une économie zéro-CO₂, sans effets secondaires graves sur l'environnement ou, au contraire, ils peuvent entraîner des dommages collatéraux considérables ou même être très nuisibles pour l'environnement et augmenter les émissions de gaz à effet de serre. Le résultat dépendra essentiellement des choix politiques, des mesures incitatives et de la recherche et du développement publics et privés.
- 7) Une bonne partie de la réduction des émissions de CO₂ peut être obtenue sans aucune pénalité de coût (comme, par exemple, pour l'éclairage ou les réfrigérateurs de basse consommation). Le coût de l'élimination du reste des émissions de CO₂ issues de l'utilisation des combustibles fossiles devrait se situer entre 10 et 30 \$ la tonne de CO₂.
- 8) La transition vers un système zéro-CO₂ peut être faite de façon compatible avec le développement économique local dans des zones qui produisent maintenant des combustibles fossiles.

Extrait de [*Sans carbone et sans nucléaire Une feuille de route pour la politique énergétique pour les États-Unis*](#)

Recommandations: Les douze principes anti-CO₂

Les 12 mesures politiques fondamentales qui doivent être mises en œuvre aussi vite que possible pour atteindre une économie zéro-CO₂ sans énergie nucléaire sont les suivantes :

- 1) Les revenus prévus (environ 30 à 50 milliards de dollars par an) seraient utilisés pour des installations de démonstration, la recherche et développement, et des mesures de transition pour les travailleurs et les communautés locales.
- 2) Supprimer toutes les subventions et réductions d'impôts pour les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire (y compris les garanties pour le stockage des déchets nucléaires des nouvelles centrales, les garanties sur les prêts et les assurances subventionnées).
- 3) Supprimer les subventions pour les biocarburants obtenus à partir de cultures vivrières.
- 4) Faire construire des installations de démonstration pour des technologies de production importantes, notamment pour les centrales solaires thermiques avec stockage de la chaleur, les centrales photovoltaïques de taille moyenne ou importante, et la capture de CO₂ par micro-algues pour la production de carburant liquide.
- 5) S'appuyer sur la capacité d'achat au niveau fédéral, étatique et local pour créer des marchés pour les technologies avancées les plus importantes stratégiquement, notamment les véhicules hybrides plug-in.
- 6) Interdire les nouvelles centrales au charbon qui ne disposent pas d'un stockage du carbone.
- 7) Instituer au niveau fédéral des normes de haute efficacité énergétique pour les appareils ménagers.
- 8) Instituer des normes d'efficacité strictes pour les bâtiments aux niveaux local et étatique, avec des mesures d'incitation fédérales pour favoriser leur adoption.
- 9) Instituer des normes d'efficacité strictes pour les véhicules efficaces et faire des hybrides plug-in le véhicule standard du gouvernement américain d'ici 2015.
- 10) Mettre en place des procédures fédérales de passation des marchés publics qui avantagent les « utilisateurs précoces » des mesures de réduction de CO₂.
- 11) Adopter des programmes dynamiques de recherche, développement, et de construction d'installations pilotes pour des technologies susceptibles d'accélérer l'élimination du CO₂, comme la production solaire directe d'hydrogène (photosynthétique, photo-électrochimique, et autres méthodes), la géothermie roches chaudes et les centrales à cycle combiné avec gazéification intégrée utilisant une biomasse capable de piéger le CO₂.
- 12) Créer une commission permanente sur l'énergie et le climat dans le cadre du Conseil consultatif scientifique de l'Agence américaine de protection de l'environnement.

Glossaire

Moyen de production en base : Une centrale de grande taille destinée à une production électrique en continu.

Biocombustible : Combustible dérivé de la biomasse.

Biomasse : Matière organique produite par photosynthèse.

Capture du carbone : Capture du dioxyde de carbone quand des combustibles contenant du carbone sont brûlés pour produire de l'énergie.

Séquestration du carbone : Stockage en site géologique profond du carbone pendant de très longues durées (milliers d'années) pour empêcher sa présence dans l'atmosphère.

LFC : Lampe fluorescente compacte, une lampe à basse consommation.

Cogénération : Production combinée de chaleur et d'électricité. Dans ce dispositif, une partie de l'énergie obtenue par la combustion d'un combustible est utilisée sous forme de chaleur (par exemple pour le chauffage de bâtiments ou des procédés industriels), et une autre partie est utilisée pour la production d'électricité.

Centrale à cycle combiné : Centrale électrique dans laquelle les gaz chauds issus de la combustion du combustible (généralement du gaz naturel) sont utilisés pour faire fonctionner une turbine à gaz pour la production d'électricité. Les gaz d'échappement de la turbine sont encore chauds et sont utilisés pour produire de la vapeur qui est utilisée pour l'alimentation d'une turbine à vapeur, qui fournit à son tour de l'électricité.

Production électrolytique d'hydrogène : L'utilisation de l'électricité pour séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau.

Pompe à chaleur géothermique : Une pompe à chaleur qui se sert de la température relativement constante qui existe à un ou quelques mètres sous la surface du sol pour augmenter l'efficacité de la pompe à chaleur.

CCGI : Centrale à cycle combiné avec gazéification intégrée. Cette installation effectue une gazéification du charbon ou de la biomasse et utilise ensuite les gaz dans une centrale à cycle combiné.

LED : Leadership in Energy and Environmental Design. Un système de notation utilisé pour évaluer l'efficacité énergétique des bâtiments. Le niveau Platinum est la notation la plus élevée.

Micro-algues : Algues minuscules qui poussent dans des environnements très divers, notamment en eau salée.

Nanocondensateur : Un condensateur dont la superficie des électrodes est énormément augmentée par l'utilisation d'une nanotechnologie.

Hydrogène photolytique : Hydrogène produit par des plantes, par exemple des algues, en présence de la lumière du soleil.

Hydrogène photo-électrochimique : Hydrogène produit directement grâce à des appareils similaires à certaines cellules photovoltaïques qui produisent de l'électricité. Avec ce dispositif, on produit de l'hydrogène à la place de l'électricité.

Stockage par pompage hydraulique : Utilisation de l'électricité en période hors pointe pour pomper de l'eau dans un réservoir et utiliser par la suite une centrale hydraulique pour produire de l'électricité avec l'eau stockée pendant les périodes de pointe (ou, en cas d'utilisation avec de l'éolien, quand il n'y a pas de vent).

Éclairage solaire à fibre optique : Un câble en fibre optique qui achemine la lumière du soleil sur toute sa longueur sans perte sur les côtés, à la manière dont un fil conducteur transporte l'électricité. Il peut être utilisé pour l'éclairage intérieur de bâtiments pendant la journée.

Solaire photovoltaïque : Cellules solaires photovoltaïques : appareils qui transforment la lumière incidente du soleil en électricité.

Centrale solaire thermique : Centrale qui se sert de réflecteur pour concentrer l'énergie solaire et chauffer des liquides qui sont ensuite utilisés pour produire de la vapeur et de l'électricité.

Réserve tournante (« spinning reserve ») : Capacité des centrales électriques qui restent en fonctionnement mais sans produire de façon à pouvoir répondre à des augmentations subites de la demande électrique.

Capacité en réserve : Centrales électriques qui restent en réserve pour pouvoir répondre à des augmentations de la demande électrique.

Supercondensateur : Un condensateur qui peut stocker beaucoup plus d'électricité par unité de volume que les condensateurs normaux.

V2G: Système véhicule-à-réseau. Des voitures garées sont raccordées au réseau. Quand la charge des batteries est faible, le réseau procède à leur recharge. Quand la charge est suffisante et que le réseau a besoin d'électricité, un signal du réseau permet à la batterie d'alimenter le réseau en électricité.

Notes

- 1) Ce numéro de *Energie et Sécurité* est un résumé d'un rapport au titre éponyme qui sera publié sur le web en octobre 2007 et publié sous forme de livre en octobre 2007 par RDR Books. On pourra trouver les références dans le rapport lui-même sur <http://ieer.org/resource/reports/carbon-free-and-nuclear-free/>. Cette étude est un projet

conjoint du Nuclear Policy Research Institute (NPRI) et de l'Institut pour la recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER). Le NPRI et l'IEER souhaitent remercier de leur soutien The Park Foundation, The Lear Family Foundation, The Lintilhac Foundation et de nombreux donateurs individuels qui souhaitent rester anonymes.

- 2) Sur internet à l'adresse www.supremecourtus.gov/opinions/06pdf/05-1120.pdf
- 3) Sur la base d'une population mondiale de 9,1 milliards et une population américaine de 420 millions d'habitants en 2050.
- 4) Les compensations permettent à l'acheteur de continuer à émettre du CO₂ en payant pour des réductions de CO₂ réalisées par la partie à qui les compensations sont achetées. Elles peuvent aboutir ou non à des réductions réelles de CO₂. Même quand c'est le cas, les émissions peuvent être immédiates alors que les réductions peuvent être à long terme. La vérification est difficile et coûteuse.
- 5) La gazéification intégrée du charbon fonctionne de la façon suivante : le charbon est mis en réaction avec la vapeur, ce qui produit un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Lorsqu'il est brûlé, ce mélange donne du CO₂ et de l'eau. Ce procédé peut aboutir à l'élimination des métaux lourds avant la combustion ; la quasi-totalité du soufre du charbon peut être aussi capturé, ce qui empêche presque toutes les émissions de dioxyde de soufre. Lorsqu'on utilise de l'oxygène pratiquement pur pour la combustion, la capture du CO₂ devient beaucoup moins coûteuse. Le CO₂ peut ensuite être injectée dans une formation géologique profonde. Dans la mesure où la biomasse retire le CO₂ de l'atmosphère, la séquestration du CO₂ lorsque le combustible est de la biomasse conduit à une réduction du CO₂ atmosphérique, pour autant que le procédé de production de la biomasse n'implique pas des émissions de CO₂ plus importantes.
- 6) Saudi-US Relations Information Service, "27th GCC Supreme Council Summit Wrap-up," 13 décembre 2006, en ligne sur www.saudi-us-relations.org/articles/2006/loi/061213-gcc-summit.html. Consulté le 20 juin 2007.
- 7) Voir par exemple le rapport de l'Académie nationale des sciences (NAS), publié en 2006 (<http://books.nap.edu/openbook.php?isbn=030909156X>).

[Énergie et Sécurité No. 39 Index](#)

[Énergie et Sécurité Index](#)

[IEER page d'accueil](#)

L'Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement

Envoyez vos impressions à la rédactrice en chef, *Énergie et Sécurité*: [annie\[at\]ieer.org](mailto:annie[at]ieer.org)

Takoma Park, Maryland, USA

(La version anglaise de ce numéro, *Science for Democratic Action* v. 15, no. 1, a été publiée en août 2007.)

Mise en place décembre 2007