

# Énergies renouvelables : le contexte

Depuis quelques années, les énergies renouvelables, dont le contre-choc pétrolier de 1986 avait fortement ralenti le développement, connaissent un très fort regain d'intérêt. La récente flambée des cours du pétrole et du gaz et la préoccupation grandissante de la communauté internationale vis-à-vis du réchauffement climatique en sont les premières causes. S'y ajoutent les premiers et indéniables succès industriels remportés par des filières considérées jusqu'à récemment comme marginales, en particulier l'éolien, dont la croissance aussi bien dans certains pays industrialisés que dans des pays émergents au cours des cinq dernières années est tout à fait remarquable.

Après une longue période de pénitence, les énergies renouvelables retrouvent une légitimité qui conduit parfois les plus optimistes à compter sur un développement explosif de leurs diverses applications pour résoudre à moyen terme (une vingtaine d'années) les problèmes d'approvisionnement énergétique de l'humanité sans contribuer aux émissions de gaz à effet de serre.

Pour y voir plus clair, il nous paraît utile de dégager, pour le siècle qui vient, quelques éléments de contexte général de ce développement encore largement potentiel.

## ENJEUX ET CONTRAINTES DU LONG TERME

En ce qui concerne son système énergétique, l'humanité est en effet confrontée à quatre défis principaux :

- La nécessité d'apporter des services énergétiques suffisants et adaptés pour assurer le développement des 8 ou 9 milliards d'habitants attendus sur la planète vers 2050 (6,4 aujourd'hui, dont 4 dans les pays en cours de développement).
- La nécessité de revenir dès 2050 à des émissions de CO<sub>2</sub> compatibles avec une augmentation déjà très significative mais probablement encore contrôlable des risques de réchauffement (environ 2 degrés à la fin du siècle), soit des émissions de l'ordre de

BENJAMIN DESSUS



12 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2050 (ou 3,3 milliards de tonnes de carbone).

- La nécessité de développer activement des solutions de rechange pour survivre à l'épuisement – assuré – des ressources fossiles avant ou vers la fin du siècle pour le pétrole et le gaz, une centaine d'années plus tard au maximum pour le charbon, vers la fin du siècle pour l'uranium, et à plus long terme en cas d'utilisation massive éventuelle (mais sans danger?) du plutonium.
- La nécessité d'anticiper les conséquences du réchauffement climatique inéluctable résultant des surémissions passées et actuelles, à la fois sur les besoins de services énergétiques et sur le fonctionnement des systèmes de production énergétique (modification de l'hydrologie, sécheresses, évolution de la productivité des biomasses agricoles et forestières, etc.).

Ces éléments incontournables fixent les enjeux et les contraintes aux horizons 2050 et 2100 avec une précision suffisante pour effectuer les exercices de « back casting » qui, à partir de règles normatives à long terme, remontent le temps jusqu'à aujourd'hui pour décrire des chemins diversifiés de solutions potentielles aux différents problèmes posés.

## TRADUCTION ÉNERGÉTIQUE DE CES CONTRAINTES

Les sources énergétiques significativement mobilisables au cours du siècle prochain et *a fortiori* avant 2050 sont de trois types :

- Les énergies fossiles, pétrole, gaz naturel, charbon.
- Les énergies fissiles (uranium, plutonium).
- Les énergies renouvelables, (solaire, éolien, biomasse, hydraulique, géothermie, énergies des mers).

Les énergies de fusion font l'objet de recherches dont l'issue est incertaine mais dont on est pratiquement sûr

qu'elles ne pourront aboutir à des applications massives éventuelles que dans la dernière partie du siècle : elles sont donc exclues du champ des solutions aujourd'hui applicables au problème posé, sinon à vouloir substituer un pari à une solution.

### CONTRAINTES SUR LES FOSSILES

La première contrainte globale concerne les émissions de CO<sub>2</sub>. La norme édictée par les scientifiques d'émissions inférieures à une douzaine de milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2050 (ou 3,3 milliards de tonnes de carbone) se traduit directement par une limite supérieure admissible de consommation des différentes sources fossiles :

- Pour le pétrole pris isolément : 3,9 milliards de tep (émissions de 0,83 t de C par tep).
- Pour le gaz pris isolément : 5 milliards de tep (émissions de 0,65 t de C par tep).
- Pour le charbon pris isolément : 2,9 milliards de tep (émissions de 1,12 t de C par tep).
- Et, pour un bouquet de ces sources, une valeur comprise entre les deux extrêmes (2,9 et 5 Gtep) pour une consommation actuelle de 9 Gtep en 2004.

Cette contrainte pourrait cependant être relâchée si pouvaient se développer assez vite des moyens de capture et de séquestration du CO<sub>2</sub> supplémentaire aux mécanismes naturels de la biosphère. On pense en particulier à la séquestration provisoire du carbone dans les forêts nouvelles (sur des périodes de 30 ans à une centaine d'années) et à la séquestration du carbone pour des durées bien supérieures (plusieurs siècles, voire des millénaires) dans le sous-sol terrestre ou dans les océans.

Hors séquestration supplémentaire, la consommation d'énergie fossile en 2050 peut donc osciller entre 5 et 2,9 milliards de tep selon les proportions de chaque source. On peut retenir une valeur de l'ordre de **4 Gtep pour un mix de ces différentes sources.**

La séquestration du CO<sub>2</sub> des centrales électriques thermiques à combustibles fossiles, si elle était totalement réalisable pour toutes les centrales existantes et nouvelles, pourrait concerner près de 5 Gtep de combustibles fossiles en 2030 et plus de 6 Gtep en 2050. Mais de nombreuses limitations risquent de réduire ce potentiel théorique (la taille et la durée d'utilisation annuelle des centrales, la proximité de sites de stockage favorables, etc.). La séquestration de la moitié du potentiel théorique de 2050 serait déjà un objectif très ambitieux qui supposerait acquise la possibilité de stockage sans risque dans des aquifères, hypothèse non encore validée. Il n'est donc pas raisonnable de penser

séquestrer plus de 3 gigatonnes de carbone à l'horizon 2050, essentiellement en provenance du charbon. Cela permettrait la mise à disposition d'au maximum 2,2 Gtep supplémentaires aux 4 Gtep retenus, compte tenu du fait que le processus de séquestration est lui-même source d'émissions (de l'ordre de 20 % supplémentaires).

Séquestration comprise, c'est donc d'un potentiel de 4 à 6,2 Gtep d'énergies fossiles dont pourrait disposer l'humanité pour ses besoins énergétiques en 2050 (soit 0,5 à 0,8 tep/habitant).

On peut se rendre compte de l'enjeu quand on sait que la consommation d'énergie fossile mondiale a atteint déjà 9 milliards de tep (2,7 de charbon, 3,9 de pétrole, 2,3 de gaz naturel) en 2004 pour « seulement » 6,4 milliards d'habitants (1,4 tep par habitant) et que l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit plus de 13,8 Gtep dès 2030 (1,7 tep/hab).

L'écart ne peut donc être comblé qu'avec des sources n'émettant pas de gaz à effet de serre... et en le réduisant le plus possible par l'efficacité énergétique.

La seconde contrainte porte sur les réserves des différentes sources d'énergie fossile. Sans entrer dans le débat ouvert sur l'horizon du pic de production pétrolier, il suffit pour notre propos de rappeler qu'à l'horizon de la fin du siècle, il est plus que probable que les ressources de pétrole et de gaz seraient épuisées, si les contraintes d'émissions de CO<sub>2</sub> ne venaient entraver la consommation de ces ressources. L'horizon d'épuisement des charbons se situe à plus long terme, nettement au-delà de 2100.

Par contre, le respect des contraintes d'émissions sans recours à la séquestration, avec une consommation de l'ordre de 4 Gtep par an tous fossiles confondus, aurait pour conséquence un allongement important (de plusieurs dizaines d'années) de la durée de vie des différentes réserves.

### QUELLE TRADUCTION EN TERMES DE DISPONIBILITÉ D'ÉNERGIE FINALE ?

La traduction de ces consommations d'énergie primaire en énergie finale (celle qui arrive aux bornes des usagers, industriels ou domestiques, carburant, électricité, combustible) dépend à la fois des technologies et de la proportion des différents usages finaux dans le bilan global (force motrice fixe ou mobile, chaleur).

En 2004, avec une proportion de l'ordre de 80 % d'énergies fossiles dans le bilan mondial en énergie primaire, de 6 % d'énergies fissiles et de 14 % d'énergies renouvelables, l'énergie finale produite par l'ensemble du système énergétique mondial n'atteint que 68 % de

l'énergie primaire consommée. Donc, 32 % de l'énergie primaire, soit 3 600 Mtep, sont perdus en route dans les diverses transformations (production d'électricité, raffinage, etc.) et dans les transports jusqu'au consommateur final.

### Pertes du système électrique et centralisation des moyens de production

En 2004, les pertes de chaleur de la production thermique fossile d'électricité mondiale étaient de l'ordre de 1 700 Mtep (19 000 TWh), celles de la production nucléaire de 500 Mtep (5 600 TWh). Les pertes de transport d'électricité étaient de l'ordre de 100 Mtep (1 200 TWh). Au total, le système électrique mondial, qui satisfait 16 % des besoins finaux d'énergie, est donc responsable de 65 % des pertes d'énergie primaire du système.

Mais l'ampleur de ces pertes tient principalement au fait que, dans la plupart des cas, la chaleur perdue par les centrales électriques thermiques n'est pas récupérée pour d'autres usages. La cogénération, c'est-à-dire la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'un combustible, conduit par contre à des rendements d'utilisation du combustible bien meilleurs, de l'ordre de 75 à 80 % (contre 35 à 50 % en génération simple d'électricité). Mais cet usage n'est possible que si des concentrations urbaines ou industrielles suffisantes se trouvent à proximité des centrales et peuvent utiliser cette chaleur. La centralisation des moyens de production d'électricité qui a caractérisé la deuxième moitié du vingtième siècle a pratiquement exclu cette possibilité. En effet aujourd'hui, les sites de centrales thermiques nucléaires ou fossiles produisent pour la plupart de 1 000 à 4 000 MW d'électricité et donc de 2 000 à 8 000 MW de chaleur (les besoins de chauffage de 200 000 à 1 million de ménages). De plus, des considérations d'environnement et de sécurité conduisent à les éloigner de plusieurs dizaines de kilomètres des conurbations importantes.

L'avènement de moyens de production d'électricité performants et de tailles beaucoup plus modestes (de dizaines de kW à des dizaines de MW) est de nature à modifier profondément cette situation en permettant de systématiser l'usage de la cogénération et d'ainsi réduire très fortement les pertes du système énergétique.

Ces pertes proviennent d'abord de la production et du transport de l'électricité (55 à 70 % de pertes de chaleur pour la production d'électricité à partir des fossiles ou de l'uranium, 5 à 7 % de pertes de transport). Les pertes de production et de transport des carburants pétroliers sont nettement plus faibles (de 10 à 15 %). Les pertes de préparation et de transport des combustibles (gaz, charbon) sont de l'ordre de 5 %.

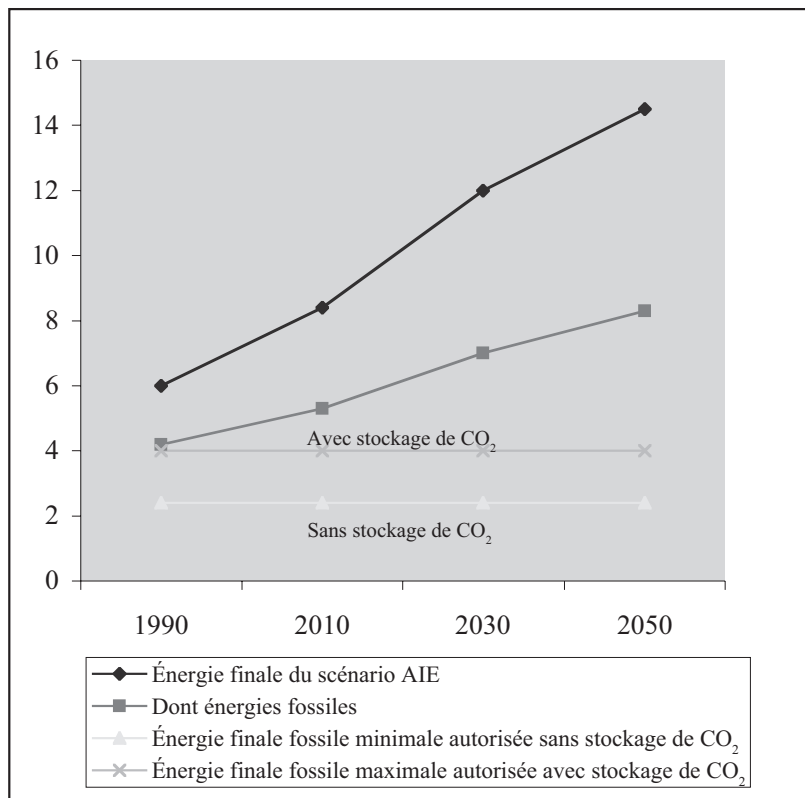
En fonction des technologies et du degré de centralisation des moyens de production (en particulier d'électricité) retenus pour 2050, le rendement du système énergétique mondial (le rapport énergie finale/énergie primaire), actuellement de 68 % (mais de 64 % seulement dans un pays comme la France qui utilise beaucoup d'électricité) peut évoluer de 60 % (dans une civilisation consommant une proportion plus forte d'électricité sans effort de décentralisation) à 80 %, avec une organisation beaucoup plus décentralisée de la production d'électricité et le développement des cogénérations qui deviennent alors possibles. Dans ces conditions, la consommation de 4 milliards de tep d'énergies fossiles « autorisée » en 2050 (en l'absence de séquestration) permettrait de satisfaire de 2,4 à 3,2 Gtep d'énergie finale.

Dans le cas où un grand programme de séquestration de carbone serait mis en place, la consommation fossile supplémentaire autorisée, évaluée plus haut à 2,2 Gtep au maximum en 2050, le serait dans des usines de production électrique de grande taille (pour permettre le captage séquestration) excluant de fait toute cogénération. Le rendement global du système énergétique (Énergie finale/Énergie primaire) pourrait en pâtir<sup>1</sup> et tomber au-dessous de 65 % et l'énergie finale totale disponible culminer à 4 Gtep.

Au-delà de ces limites, les besoins d'énergie finale de l'humanité ne pourraient donc être significativement satisfaits en 2050 que grâce à des énergies non carbonées, énergies renouvelables ou énergie nucléaire. L'écart avec l'énergie finale consommée aujourd'hui au niveau mondial (7,6 Gtep) est déjà considérable. Il devient rédhibitoire en 2050 si les politiques énergétiques actuelles étaient poursuivies : le scénario « business as usual » de l'AIE conduit en effet à un besoin d'énergie finale de 11,6 Mtep dès 2030 et de l'ordre de 14 Gtep en 2050. Il faudrait dans ces conditions disposer de 10 à 11,5 Gtep d'énergie finale sans carbone en 2050 contre moins de 2 Gtep en 2004, plus de deux fois plus qu'en projette le scénario.

1. Sauf si l'on pouvait installer des complexes industriels autour de ces sites pour utiliser une partie de la chaleur perdue.

### Évolution des dépenses d'énergie du scénario AIE (Gtep finales) et contraintes d'émissions de carbone



L'analyse de ces chiffres montre tout d'abord la nécessité absolue de politiques prioritaires de maîtrise de l'énergie qui permettent de contenir les besoins d'énergie finale nécessaires à la satisfaction d'un ensemble de services déterminés dans des limites plus raisonnables. Politiques sans lesquelles il n'est pas vraisemblable d'imaginer un bouclage du bilan sans un supplément important d'énergies fossiles, même avec un développement simultané et sans précédent de la séquestration du carbone des centrales thermiques, du recours aux énergies renouvelables et aux énergies nucléaires. Supplément d'autant plus important que l'augmentation du recours à l'électricité et la poursuite de politiques de production centralisée viendraient dégrader le rendement Énergie finale/Énergie primaire du bilan énergétique mondial.

Indépendamment de cette exigence majeure, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire, dans leurs technologies actuelles, présentent des caractéristiques, des opportunités d'usage, des risques et des limites d'utilisation très contrastés qui doivent être impérativement pris en compte.

### ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Les technologies nucléaires actuelles se caractérisent par les éléments suivants :

- Une production très concentrée d'électricité de base ou semi-base (600 à 1500 MW, plus de 6000 heures par an) avec des rendements de l'ordre de 30 à 35 %, sans utilisation de la chaleur perdue (même si elle pourrait être éventuellement envisagée dans le cadre de coprocessus industriels (voir note 1).
- Le recours à un combustible épuisable, l'uranium, avec cependant une possibilité de recyclage, encore très partielle, du plutonium produit par la fission nucléaire, au prix d'un renforcement important des risques de prolifération nucléaire.
- Des risques d'accident majeur.
- Un problème spécifique de déchets et de prolifération des applications civiles vers les applications militaires.

Le développement massif de l'énergie nucléaire, avec les technologies actuelles, même si l'on fait l'impasse sur les risques spécifiques qu'elle comporte, se heurte donc aux limites suivantes :

- la présence de besoins massifs d'électricité de base (en 2004, ces besoins représentaient environ 8 % de la consommation finale d'énergie mondiale) et donc la présence de réseaux électriques de taille importante,
- la disponibilité d'uranium,
- la dégradation du rendement du système énergétique global.

Le récent exercice auquel se sont livrés Benjamin Dessus et Philippe Girard dans le scénario SUNBURN<sup>2</sup> de relance mondiale massive du nucléaire donne une première idée des ordres de grandeur des conséquences énergétiques et environnementales d'une telle politique. Ce scénario, essentiellement fondé sur une analyse de l'évolution des besoins d'électricité de l'ensemble des pays du monde d'ici 2030, sans autres contraintes que celles d'ordre technique ou de dynamique industrielle, conduirait à une croissance massive des marchés nucléaires d'ici 2030 : de 3 GW par an ces dernières années, le marché annuel pourrait ainsi passer à 100 GW en 2030 si aucune contrainte, ni d'acceptation des populations, ni économiques et financières, ni techniques, ni politiques, ne venait en perturber le développement. Avec une production totale de 8 900 TWh en 2030 (contre 2 577 TWh en 2005), ce scénario paraît à leurs auteurs représenter une borne supérieure industrielle « optimiste » de ce que pourrait représenter la contribution maximale d'un programme massif mondial de relance du nucléaire.

*S'il était intégralement appliqué, il permettrait d'éviter, en 2030, 9 % de l'ensemble des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au scénario prévisionnel de l'AIE, mais seulement 2,9 % des émissions cumulées de 2006 à 2030 de ce même scénario, soit 7 mois d'émissions de 2030.*

Il permettrait d'autre part une économie cumulée d'ici 2030 de 8 GTEP de combustibles fossiles (8 mois environ de la consommation de fossiles de 2030), essentiellement du charbon et du gaz naturel. Il s'avérerait par contre largement inopérant dans la substitution du pétrole, car le peu d'électricité mondiale produite avec du pétrole l'est généralement pour des besoins de pointe (excepté dans quelques pays pétroliers).

## LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

La diversité de filières que recouvre le vocable générique « énergies renouvelables » répond, au contraire du nucléaire, à des besoins d'énergie finale beaucoup plus diversifiés : chaleur directe (solaire direct, géothermie basse température), carburant (biocarburants liquides, biométhane), combustible (bois, biométhane, etc.), électricité (photovoltaïque, éolien, hydraulique, etc.).

À l'inverse du nucléaire, il n'existe pas de problème de pérennité de la ressource. Il peut par contre exister des limites d'accès aux différentes ressources renouvelables qui font l'objet de concurrence d'usage (irrigation/électricité, biomasse énergie/alimentation, etc.).

À l'inverse encore du cas du nucléaire, la dispersion de la ressource conduit généralement à privilégier des productions décentralisées, à partir d'unités de taille beaucoup plus modeste que dans le cas du nucléaire, associées ou non à des réseaux de distribution. Cette caractéristique, généralement présentée comme un obstacle majeur au développement des filières renouvelables (on ne bénéficie pas des effets d'échelle), peut être contrebalancée par des effets de série et par les possibilités de cogénérations diverses qu'entraîne la proximité des usagers : cogénération électricité-ex-biomasse et chaleur, cogénération carburant chaleur, etc., avec l'amélioration du rendement énergétique global du système énergétique qu'on peut en attendre.

Par contre, le développement des renouvelables se heurte aux questions d'intermittence et de dilution spatiale de la ressource (aspect aléatoire de la production d'électricité solaire ou éolienne, collecte et transport de la biomasse, etc.).

Enfin, les conséquences potentielles du réchauffement du climat sont de natures différentes selon qu'il s'agit d'énergies de stock (fossiles et fissiles) ou de flux (renouvelables).

Les fluctuations du climat n'altèrent pas en effet la ressource que constituent les différents stocks d'énergie fossile mais peuvent contraindre leur utilisation. C'est ainsi que les ressources en eau nécessaires au refroidissement des centrales thermiques de grande taille (fossiles ou nucléaires) peuvent venir à manquer en cas de réchauffement.

Par contre, les mêmes fluctuations du climat peuvent altérer dans un sens ou dans l'autre la ressource renouvelable elle-même : ressources hydrauliques, régimes des vents, nature et productivité des biomasses agricoles et ligneuses, etc.

2. Cahiers de Global Chance n° 21.

**Caractéristiques principales des énergies finales obtenues par les filières renouvelables et nucléaires avec les technologies actuelles**

	Nucléaire	Hydro	Éolien	Vagues marées	Capteurs solaires	Photovoltaïque	Géothermie	Bois Cultures déchets	Biogaz
Flux Stock	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Chaleur directe					X		X		
Électricité de base	X						X	X	X
Électricité de pointe		X						X	X
Électricité fatale		X	X	X		X			
Carburant								X	X
Combustible								X	X
Cogénération						?	X	X	X

Cette présentation rapide des caractéristiques comparées du nucléaire et des renouvelables met en évidence la nécessité d'approches très différentes qu'on pourrait illustrer par une comparaison avec l'agriculture :

- Le nucléaire se présente, au moins pour les 30 ans qui viennent, comme une *monoculture centralisée* (l'électricité), largement « hors sol » à vocation *d'exportation en dehors des territoires de production* à l'aide de réseaux de transport et de distribution massifs.
- Les énergies renouvelables s'apparentent plus à la *polyculture vivrière* dont l'objectif est de répondre à un ensemble diversifié de besoins territoriaux à partir de ressources locales.

C'est dire que l'analyse des enjeux et des opportunités que représentent les énergies renouvelables suppose d'entrer dans une analyse diversifiée des « filières » d'usage de ces énergies avec une grande attention aux aspects temporels et spatiaux de leurs caractéristiques.

Si l'on veut sérieusement prendre en compte les contraintes de ce siècle, dans une logique de développement et de prévention des catastrophes, il faut donc impérativement :

- prendre conscience de la norme autorisée de consommation de fossiles ;
- s'engager dans des politiques volontaristes de maîtrise de la demande ;
- s'intéresser aux conditions d'obtention de rendements énergie finale/énergie primaire élevés des systèmes énergétiques ;
- analyser de façon détaillée les enjeux, les opportunités, les cibles prioritaires les dynamiques industrielles et les limites des énergies renouvelables.

C'est pour contribuer à ces deux derniers chantiers que Global Chance et l'IEPF vous proposent ce numéro spécial commun.