

L'urgence énergétique (II)

Ressources énergétiques renouvelables

Dans ce volet, nous prenons le pouls des énergies renouvelables pour connaître leurs origines et leurs promesses, entre leur potentiel maximal théorique et leurs capacités de production réelles. Dans le prochain volet, nous prendrons connaissance de l'état actuel de leur développement, de leurs coûts d'investissement et de production en France et dans le monde.

1. Des ressources immenses

Physiquement, la Terre reçoit chaque année en moyenne une *énergie* d'environ 134 000 milliards de Tonne Equivalent Pétrole (134 000 gigaTEP ou encore 134 000 GTEP) en provenance du Soleil, à comparer avec la *consommation mondiale annuelle d'énergie* en 2004 (11,7 GTEP)¹.

La *puissance* solaire que l'atmosphère extérieure reçoit dans une direction perpendiculaire au Soleil est de 1367 W/m² (énergie par seconde traversant chaque mètre carré), ce qui représente une puissance solaire totale de 180 millions de gigawatts (180 PW - *pétawatt*) irradiant la Terre. Calculée en moyenne sur l'ensemble de la Terre, cette puissance équivaut à 342 W/m². Environ 29% de cette puissance est réfléchi par la Terre ; 47 % est absorbé thermiquement par l'atmosphère, les continents et les océans; 23 % est transformé dans le processus d'évaporation/précipitation ; 0,2% est converti en énergies convectives (vents, courants marins, vagues) et 0,06% en biomasse par photosynthèse.

Après absorption et réflexion, on dispose sur le sol terrestre et par beau temps d'une puissance maximale d'environ 1000 W sur chaque mètre carré de surface perpendiculaire au soleil à midi.

Il faut encore ajouter l'énergie d'interaction gravitationnelle de *marées* (Lune + Soleil) qui représente 0,0017% de l'énergie solaire incidente sur la Terre, et l'énergie *géothermique* provenant directement du noyau, du manteau et de la croûte terrestre (50 GTEP au total, soit 0,06 W/m²).

Notons encore que les gaz à effet de serre relâchés par les humains dans l'atmosphère depuis un bon siècle entraînent un déséquilibre excédentaire de plus d'un W/m² dans le bilan énergétique Terre-Soleil, à l'origine du *réchauffement climatique* accéléré qui a commencé depuis quelques décennies (*cf.* volet VI).

2. Le potentiel énergétique renouvelable

Évaluer le potentiel solaire, éolien, hydraulique, biomassique, marémoteur, géothermique, thermohalin (vagues, courants marins, thermodynamique) est possible à l'échelle mondiale ou locale mais la méthode change selon la nature de ces énergies.

- On peut le faire théoriquement, avant tout rendement de conversion : c'est le cas du *potentiel hydraulique mondial*, évalué à 47 000 térawatt-heures (47 000 TWh ou 47 000 milliards de kWh), dont moins de 10% sont actuellement exploités [1]. On peut comparer ce chiffre à la *production mondiale d'électricité* qui s'est élevée à 21600 TWh en 2005.

Pour la France, le *potentiel hydraulique terrestre* est d'environ 266 TWh/an, dont 100 TWh/an au moins sont récupérables de manière rentable et 70 kWh/an sont déjà exploités. Il reste environ 23,4 TWh/an à équiper par des centrales hydroélectriques de puissances unitaires comprises entre 10 MW et 50 MW; 3 à 4 TWh/an par des installations de petites puissances (0,1 à 10 MW) et 1 TWh par des microcentrales (puissances unitaires de 10 à 100 kW).

1 une TEP représente une énergie thermique de 11600 kWh produite par effet Joule électrique.

- De même, le **potentiel solaire mondial** représentant l'énergie solaire reçue au sol en moyenne annuelle, compte tenu de l'ensoleillement réel, est de l'ordre de 95000 GTEP (1,1 milliards de TWh).

Pour la France, le potentiel solaire est d'environ 60 GTEP/an (700 000 TWh/an), à comparer avec la consommation totale d'énergie française en 2005 (276,5 MTEP en énergie primaire et 160,6 MTEP en énergie finale après rendements).

L'utilisation de l'énergie solaire la plus efficace est obtenue par les installations de *chauffage solaire basse température*. Les rendements de conversion rayonnement/chaaleur des panneaux solaires dépassent 95%, ce qui conduit à des rendements moyens d'*installation solaire* de l'ordre de 40 à 65% dans n'importe quelle région française avec des productivités moyennes de l'ordre de 300 à 800 kWh/an par m² de panneau solaire selon les usages (chauffage de l'eau chaude, des bâtiments, des piscines, préchauffage de process industriels).

Une économie de 50 à 60% sur le chauffage et l'eau chaude sanitaire peut être réalisée dès aujourd'hui sur tous les bâtiments collectifs et individuels en généralisant les techniques solaires actuelles.

La *production d'électricité par panneaux photovoltaïques* se développe très rapidement à l'échelle mondiale. Si les rendements de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sont de 12 à 15% pour les systèmes commercialisés actuellement (silicium mono- et polycristallin), les prototypes élaborés dans les laboratoires dépassent déjà plus de 30% de rendement couramment et les dernières technologies multicouches atteignent plus de 40%, ce qui permet d'envisager une production massive dans les 20 prochaines années.

La *production d'électricité héliothermodynamique* par centrales solaires haute et moyenne température est en plein essor dans les pays et régions à fort ensoleillement. Les centrales à tour, à capteurs cylindro-paraboliques ou les petites unités Dish-Stirling ont d'ores et déjà atteint leur maturité et des rendements élevés de 30 à 40%. Leur multiplication dans ces pays permettra d'électrifier des zones déshéritées et de produire abondamment de l'*hydrogène solaire*.

Il faut aussi faire état des techniques solaires utilisées dans les usines de dessalement de l'eau de mer très énergivore, et les recherches prometteuses dans la conversion directe du méthane en hydrogène et noir de carbone par fours solaires à 2000-3000°C.

- Dans le cas du **potentiel éolien**, le calcul est mené dans le cas standard (à 10 mètres du sol, site dégagé plat et sans obstacle) et donne une valeur moyenne annuelle de l'énergie cinétique du vent nettement sous-évaluée par rapport au potentiel à 60 ou 100 mètres (hauteur actuelle des grandes éoliennes), mais il tient compte de la limite physique de l'énergie récupérable (on ne peut pas stopper l'air!) donnée par la *théorie de Betz* : 88,9% de l'énergie du vent traversant une éolienne est récupérable, ce qui représente 59,2 % de l'énergie du vent incident.

Une étude récente [2] a évalué à 480 000 TWh le *potentiel éolien mondial continental* exploitable à 10 m du sol pour les vents supérieurs à 5,1 m/s. Le potentiel réel est donc beaucoup plus élevé puisque la puissance du vent est plus que doublée de 10 m à 100 m au dessus d'un sol sans relief, et davantage encore au dessus d'un sol accidenté ou en montagne.

En France, l'énergie éolienne moyenne annuelle récupérable par mètre carré de surface verticale à 10 m d'altitude varie de 500 kWh dans les régions peu ventées à près de 7000 kWh sur certaines façades maritimes.

Diverses évaluations du *gisement éolien français raisonnablement récupérable* ont été menées récemment ; celle de l'IEER prévoit 70 TWh/an sur terre et 97 TWh/an sur mer [3]; celle de l'EED (Espace Éolien Développement) conduit à 50 TWh/an sur terre et 150 TWh/an en mer [4], à comparer avec la *production électrique française totale* (575,4 TWh en 2005).

Ces évaluations s'appuient sur les technologies actuelles (rendements nominaux de 85% par rapport à la limite de Betz ; 8000 éoliennes de 3 MW sur terre, à 30% de facteur de charge moyen;

8000 éoliennes de 5 MW en mer, 54% de facteur de charge moyen) et devront être revues à la hausse pour prendre en compte les progrès futurs (amélioration des rendements, augmentation des puissances unitaires). De plus, elles restreignent l'installation des éoliennes aux sites isolés et côtiers communément admis. Nous discuterons de tous ces points dans l'article suivant.

- Le **potentiel biomassique** est plus difficile à évaluer, compte tenu de la très grande variabilité des climats et végétations à travers le monde. La photosynthèse produit annuellement 86 GTEP sur Terre, ce qui peut être considéré comme le potentiel maximal de la biomasse. De nombreuses études et mesures satellitaires ont montré que le rendement énergétique net à l'hectare de l'agriculture intensive n'est pas supérieur à celui de la végétation naturelle et même souvent inférieur. Il varie de 2% pour la canne à sucre à environ 0,5 % pour la forêt européenne ; la productivité annuelle des cultures est de 5 à 7 TEP de biomasse par hectare en Europe.

Le *potentiel biomassique français* doit être calculé en fonction des usages écologiquement souhaitables et de la préservation de l'équilibre des sols, et non pas en soi-même. Il dépend fortement des technologies de conversion (bois énergie, types de carburants végétaux, méthanisation des déchets urbains).

Il a été évalué à 40 MTEP/an par le groupe de Bellevue [5] en fonction des utilisations à long terme. Les progrès actuels des rendements de méthanisation industrielle des déchets, des techniques de post-combustion des chaudières à granulés, de la gazéification des biomasses sèches et les recherches sur la conversion du CO₂ en carburants par les microalgues permettent d'envisager un potentiel plus élevé. Il faut cependant éviter de développer des filières « biocarburants » dont le bilan énergétique est mauvais ou qui génèrent une pollution accrue des sols (engrais, pesticides, irrigation).

Les bilans énergétiques et écologiques *actuels* ne sont pas encore assez favorables aux filières « bioéthanol » ; la filière « biodiesel » est mieux lotie, et les filières « huiles végétales » encore mieux : le rendement *énergie du carburant/énergie consommée pour le produire* varie fortement d'un « biocarburant à l'autre, mais aussi d'une méthode de calcul à une autre (< 1 pour l'ETBE, à éliminer ; 2,04 ou 1,28 pour le « bioéthanol » de betterave ; 2,9 à 3,1 ou 2,5 pour le « biodiesel » ; 4,7 à 5,5 pour les « huiles végétales », à soutenir) [6], [7].

Il faut repenser et orienter l'organisation de ces filières vers l'efficacité énergétique et la préservation des sols.

- Le **potentiel géothermique mondial** exploitable dépend du type d'exploitation:
 - la *géothermie de haute énergie* utilise l'eau des réservoirs très profonds sous forme de vapeur à haute température (150 à 350°C) pour produire de l'électricité par détente dans des turbines couplées à des alternateurs. La puissance récupérable, compte tenu des rendements thermodynamiques des centrales géoélectriques, est évaluée à près de 5000 MW électriques.

En France, on utilise déjà cette ressource (14,7 MW en Guadeloupe) Mais le développement des nouvelles techniques par injection d'eau dans des roches sèches offre des potentiels énormes de production électrique: l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) et le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) ont calculé que l'exploitation des roches entre 4,5 km et 5,5 km de profondeur sur 3 % de la surface de l'Alsace (région fortement géothermique) produirait en permanence l'équivalent d'une dizaine de réacteurs nucléaires de 1000 MW.

De plus, les réservoirs de moyenne température (100 à 150°C) peuvent aussi produire de l'électricité par des centrales à cycles combinés utilisant un fluide caloporteur. L'Allemagne développe déjà ce type d'installations et le potentiel français semble assez important;
 - la *géothermie basse énergie* (de 30 à 100°C) permet de transférer directement la chaleur des

réservoirs peu ou moyennement profonds (100 m à 3000 m) dans des réseaux de chauffage urbains. En France, elle représente un potentiel de 50 MTEP/an *renouvelables*.

Mais l'énergie géothermique n'est généralement pas utilisée de manière renouvelable. Dans une installation de chauffage géothermique de moyenne puissance (1 à 10 MW), la technique du double forage extraction-injection permet d'exploiter la ressource pendant 30 ans sans baisse de température et de la poursuivre après, moyennant une diminution de 1 à 4°C tous les 10 ans.

C'est donc une technique très efficace et potentiellement renouvelable si l'on prévoit de l'utiliser en été comme stockage de chaleur solaire ou industrielle (héliogéothermie). De telles installations fonctionnent déjà en Suisse et en France.

Le *potentiel géothermique basse température français exploitable* a été évalué à environ 6 MTEP/an (810 réseaux de chauffage urbain pour 1,7 millions d'équivalent-logements) [8].

- la *géothermie très basse énergie* (moins de 30°C): il s'agit des pompes à chaleur dites « géothermales » qui extraient de la chaleur du sol (entre 1 et 10 m de profondeur) en consommant entre 2 et 3 fois moins d'énergie électrique. Elles utilisent malheureusement des fréons à très fort effet de serre qui grèvent leur intérêt écologique; d'autre part, leurs contraintes d'implantation, leur prix d'investissement et de fonctionnement les rendent insuffisamment intéressantes pour promouvoir leur généralisation.

- Le *potentiel énergétique marin mondial* : les courants marins transportent une puissance constante d'environ 5 TW en permanence, ce qui représente une énergie de 44 000 TWh pour l'ensemble du globe terrestre. Une fraction importante (150 GW) pourrait être récupérée au moyen d'*hydroliennes* immergées et fixées le long des côtes, à raison de 18 kWh/an par m² de surface perpendiculaire au courant pour une vitesse de 5 m/s (800 fois la puissance éolienne). Des prototypes fonctionnent déjà en Norvège et au Royaume-Uni ; la France effectue des essais entre la Bretagne et le Cotentin.

En France, le potentiel très élevé sur toute la façade nord-ouest devrait pouvoir rapidement produire 25 TWh/an, et s'ajouterait au 0,5 TWh/an de la seule usine marémotrice au monde, celle de la Rance (240 MW). Le potentiel français total serait de l'ordre de 6 000 MW.

Le *potentiel houlomoteur* (énergie des vagues) est encore plus important et reste à exploiter. Quelques machines de plusieurs MW chacune sont actuellement testées au Danemark, au Royaume-Uni et au Portugal. On estime ce potentiel à 45 MW par km de côte, de sorte qu'une puissance installée de plusieurs GW est envisageable assez rapidement, sous forme de fermes marines ou de centrales [9].

Prochain article:

L'urgence énergétique (III): bilan actuel des énergies renouvelables

Thierry DE LAROCHELAMBERT

Chaire supérieure de Physique-Chimie en CPGE

Professeur de mécanique des fluides en École d'Ingénieurs

Chercheur à l'Université

[1] *Intermittent renewable energy: the only future source of hydrogen?*, Patrick MORIARTY, Damon HONNERY, *Int. J. of Hydrogen Energy* (sous presse, 2007)

[2] *Climate change 2001*, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge Press* (2001)

[3] *Low-Carbon Diet without Nukes in France – An Energy Technology and Policy Case Study on Simultaneous Reduction of Climate Change and Proliferation Risks*, Institute for Energy and

Environmental Research, USA (2006)

[4] *200 TWh/an avec l'énergie éolienne en France en 2040*, EED, 2006 - <http://www.espace-eolien.fr/Eolien/200twh.htm>

[5] *Esquisse d'un régime à long terme tout solaire*, PROJET ALTER, Ed. Syros , 66 p., (1978)

[6] *Bilan énergétique et émissions de GES des carburants et biocarburants conventionnels. Convergences et divergences entre les principales études reconnues*, ECOBILAN pour l'ADEME (juillet 2006)

[7] *L'ambivalence des filières biocarburants*, INRA Sciences Sociales n°2 (décembre 2006)

[8] *Géothermie basse énergie*, Jacques VARET, Masson (1982)

[9] *Systèmes solaires*, n°173 (2006)