

# Les Energies Renouvelables

## Un tour d'horizon

*Claude Acket - Pierre Bacher  
Mars 2005*

Un premier paradoxe: d'un côté nous entendons dire que la France est en retard dans le développement des énergies renouvelables en particulier par rapport à d'autres pays comme l'Allemagne, le Danemark, alors qu'en fait globalement, la France peut se prévaloir d'être la première en Europe dans le domaine de ces énergies renouvelables!

Cet écart de discours tient essentiellement à la façon ou non d'intégrer l'hydraulique existant dans les bilans. Globalement avec l'hydraulique la France arrive bien en tête. La position est aussi honorable pour le bois même si beaucoup peut encore être fait. Par contre, il est vrai, du retard a été pris dans ce qui est plus clair d'appeler les nouvelles énergies renouvelables NER dont l'éolien et le solaire.

Pour éclairer le débat, nous rassemblons les principales données actuelles sur les énergies renouvelables et essayons de donner quelques éléments de réflexion pour les 50 années à venir avec en perspective la réduction des rejets de gaz carbonique en 2050 (objectif division par 4).

### L'hydraulique

L'hydraulique est la première des énergies renouvelables pour la production d'électricité.

La production mondiale d'électricité à partir de l'hydraulique est de 2.400 TWh (18.5 % de 13.000 TWh). En France, ce jour, l'hydraulique produit 70 TWh/an (hors pompage) soit 13.3 % du total électricité.

La puissance installée est de 21.000 MWe. Le facteur de charge moyen est de 38 %, mais avec de grandes différences entre d'un côté les barrages sur fleuves relativement réguliers avec par exemple sur le Bas Rhône un facteur de charge de 66 %, et de l'autre les barrages-réservoirs avec par exemple pour Roselend, un facteur de charge de 25 %, pour Bort 15 %.

A l'étranger il y a quelques très grands projets: au Brésil, au Canada, en Chine. On notera le démarrage en cours du barrage des 3 Gorges avec 1 million de personnes déplacées, pour une puissance installée de 18.000 MWe (production annuelle prévue 100 TWh soit un facteur de charge prévu 55%).

La majorité de ces projets sont loin des centres de consommation et dans beaucoup de cas, ils soulèvent de graves oppositions sociologiques écologiques.

Dans nos pays européens, le potentiel en puissance supplémentaire est très limité. Les grands ouvrages sont faits, comme en France, depuis des dizaines d'années et l'ensemble des petits projets ne mène pas loin. En France, il est considéré que via la « petite hydraulique » une énergie supplémentaire de 2 à 8 TWh pourrait être produite (le Livre Blanc situe entre 400 et 2.000 MWe d'équipements).

Il faut toutefois noter que des mesures nouvelles de protection de la nature, de la réponse aux besoins en eau pour l'agriculture, conduisent à puissance installée identique à une baisse de la production énergétique significative des équipements existants.

L'expérience faite en France sur l'énergie des marées, laisse à considérer que cette voie a peu, voire pas d'avenir. Nous ne retenons pas comme significatives à venir,

d'autres formes comme les maréoliennes, l'énergie de la houle...

### **Nous considérons donc que l'hydraulique bougera peu en absolu.**

On notera que la capacité de l'hydraulique comme stockage tampon pour les sources intermittentes est très limitée. Cette capacité est quasi nulle pour le fil de l'eau qui représente un peu plus de la moitié de l'énergie produite. La puissance disponible sous forme des barrages réservoirs et du pompage est inférieure à 10.000 MW et est déjà fortement sollicitée ; elle ne pourrait donc être que partiellement mobilisée pour répondre aux fluctuations de la production intermittente.

### **Biomasse : bois, déchets de bois et agricoles.**

Si nous regardons, aujourd'hui, quelle est l'énergie d'origine renouvelable la plus employée dans le monde, elle n'a rien de nouveau et ne doit rien à la haute technologie, puisqu'il s'agit du bois.

Cette source comprend aussi les déchets de bois, la paille, etc.

Le bois, source plus que traditionnelle, constitue à ce jour l'essentiel de la production des renouvelables hors hydraulique. La comptabilisation n'est pas aisée car une grande partie de l'utilisation se fait hors circuits commerciaux. Il s'agit de l'utilisation directe des déchets végétaux et petits bois, buissons qui pour plus de 2 milliards de terriens sont la base de l'énergie disponible.

Au niveau mondial la biomasse est chiffrée entre 0.6 et 1 Gtep ( 6 à 10 % de la consommation totale d'énergie primaire).

En France l'accroissement végétal annuel de la forêt est de 86 Mm<sup>3</sup>. Actuellement, seuls 50.9 Mm<sup>3</sup> sont récoltés avec la répartition suivante: 20 Mm<sup>3</sup> vers le bois d'œuvre, 10 Mm<sup>3</sup> vers l'industrie et 20 Mm<sup>3</sup> vers le bois de feu en direct. Sous la rubrique bois de feu, il faut ajouter le bois directement collecté et utilisé hors circuits recensés, une partie du bois d'œuvre ou industriel rapidement transformée en déchets, copeaux et enfin une partie du bois d'œuvre en fin de vie (100 ans et plus). Nous trouvons comme ordre de grandeur un total de **9.5 Mtep bois énergie à ce jour.**

Il faut noter toutefois un point important: le bois n'est pas nécessairement une énergie renouvelable.

Au niveau mondial, le bois ne se renouvelle pas en totalité du fait de la déforestation. Ce n'est pas le cas en France où la forêt s'étend: + 13.7 % depuis 1989 et 0.4 % / an ces dernières années sans que pour autant le reboisement soit satisfaisant.

Il faut ajouter une très mauvaise utilisation du bois dans le chauffage individuel. (foyer ouvert rendement 10 %, avec inserts on atteint ou dépasse 55 %). Il n'en reste pas moins que même la fraction renouvelable du bois constitue la première contribution aux renouvelables hors hydraulique dans leur ensemble.

La biomasse doit déjà, se concevoir dans le cadre de la gestion normale des forêts et des déchets agricoles. Il vaut mieux brûler, récupérer de l'énergie en produisant du gaz carbonique, que laisser se faire la transformation en méthane (au moins 20 fois plus nocif à même quantité pour l'effet de serre).

Il faut aller dans le sens d'une meilleure exploitation de nos forêts en liaison avec le bois d'œuvre, le bois papier et le bois énergie, toutes ces filières sont complémentaires.

L'utilisation commerciale du bois pour le chauffage pourrait être accentuée, mais devrait rester locale, car il faut tenir compte du transport, sous les aspects bilan énergétique de l'ensemble du cycle, encombrement des routes, car le bois conduit à de grands volumes à déplacer.

En France, pays très boisé et forêts peu ou mal exploitées, cela pourrait donc

représenter un gisement supplémentaire de 6 Mtep rapidement.

Au-delà, il est possible par les effets cumulés d'une exploitation complète, d'un léger accroissement des surfaces et d'un meilleur choix des essences de passer la production annuelle brute de 86 à 120 Mm<sup>3</sup>. L'exploitation étant complète, il est possible de doubler la collecte actuelle en doublant à la fois le bois d'œuvre notamment dans les constructions et en doublant le bois énergie pour arriver à une **production énergétique équivalente à 20 Mtep en 2050**, dont une partie sous forme d'électricité (cogénération). L'accent devrait être mis sur les chaufferies collectives et réseaux de chaleur locaux à proximité des forêts.

### **Biocarburants**

La biomasse « forcée » notamment pour les biocarburants est actuellement très peu développée, en partie à cause du coût élevé des biocarburants produits.

Au niveau mondial cela ne représente que 10 Mtep et 0.33Mtep en France (0.5 % des transports).

L'usage de carburants issus des végétaux, à ce jour négligeable, devrait s'accroître fortement dans une première étape toujours en ajout aux carburants classiques, puis ensuite en remplacement total pour certaines flottes ( moteurs adaptés). Une Directive européenne demande que les biocarburants représentent 5.75 % des carburants en 2010.

Ceci sera à contrôler par les besoins en terres agricoles, les consommations d'engrais et l'irrigation ainsi que les consommations énergétiques des filières. Il faut être attentif aux choix de cultures car à ce jour certaines n'ont pas nécessairement des effets positifs nets vis à vis de l'effet de serre.

Différentes filières coexistent.

- La première filière est basée sur la fermentation alcoolique (sucres de betteraves, de blé, de cannes ...). Elle produit de l'éthanol ou bio éthanol qui peut être transformé en ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether) et en MTBE (Méthyl Tertio Butyl Ether) tous produits proches de l'essence sans plomb.
- Dans la seconde filière, le combustible est obtenu à partir de plantes oléagineuses (colza, tournesol...) dont l'huile est extraite par pressage de la graine. L'huile peut être utilisée directement ou transformée en EMHV (ester méthylique) rarement utilisé pur mais souvent en incorporation au gazole.
- Dans la troisième filière le combustible est obtenu à partir du méthane contenu dans le bio gaz, ou produit par méthanisation de produits cellulosiques.

Le bio gaz résulte de la fermentation ( bactéries ) hors de la présence d'oxygène de n'importe quel matériau organique ( déchets alimentaires, déchets de bois, paille et produits des cultures).

Le méthane obtenu, peut s'utiliser pur (c'est le GNV, ou gaz naturel véhicule) ou servir à alimenter un procédé industriel de fabrication de combustibles liquides à partir de gaz (le procédé Fischer-Tropsch).

Quelques données à l'hectare: Colza (filière huile) 1.37 tep brut et 0.87 tep net, Betterave (filière éthanol ) 3.98 tep brut et 0.76 tep net. Le passage du brut au net tient compte du passage de la plante au carburant, notamment la distillation (important pour la betterave).

A l'avenir on peut espérer qu'en choisissant les bonnes filières et grâce aux progrès,

les rendements nets dépasseront les 1 tep / hectare et pour certains 2 tep / hectare. Avec les rendements nets croissants progressivement de 1 à 2 tep / hectare et des surfaces cultivées pouvant atteindre 4 à 5 Mha ( dont une partie éventuellement dédiée à la filière bois) on peut envisager jusqu'à **8 à 10 Mtep en 2050**.

### **Déchets ménagers, industriels...**

Au niveau mondial la récupération de ces déchets représente 19 Mtep.

En France à ce jour 40% des déchets ménagers sont incinérés, dont 80 % avec récupération d'énergie.

La production d'électricité associée à cette récupération est de 2.3 TWh par an. (moins de 0.5%) et par ailleurs la fourniture chaleur est de 0.8 Mtep.

Indépendamment des besoins énergétiques, nous devrions voir s'étendre en dépit des oppositions locales, l'incinération des déchets avec récupération d'énergie en général en cogénération associée à un réseau de chaleur lorsqu'il existe dans le voisinage. A côté de l'incinération, d'autres techniques, dont la gazéification et la thermolyse, devraient aussi fortement se développer.

La valorisation thermique (réseau de chaleur) et électrique (cogénération) de tous les déchets pourrait fournir **5 Mtep en thermique et 5 TWh en électricité** avec cogénération. (idem bois énergie).

### **Géothermie**

Cette source se présente sous 2 formes: la basse température valorisée à des fins de chauffage et la haute température qui peut produire de la vapeur pour la fourniture d'électricité.

Au niveau mondial en 2000 l'ensemble représente 43 Mtep / an et une production électrique de 49 TWhe, on peut espérer doubler cette source, mais ceci restera toujours assez marginal. En France la première utilisation basse température ne représente que 0.2 Mtep à ce jour, mais une expansion relative importante est envisageable pour le chauffage de logements en quelques sites spécifiques.

Il faut compter surtout sur ce qui s'appelle géothermie de surface : l'association pompe à chaleur- électricité (valorisation énergétique facteur 3 à 4) soit en profitant des nappes phréatiques, soit simplement du sous-sol proche. Il ne s'agit plus à proprement dire de géothermie puisque la chaleur récupérée vient plutôt du soleil. (on pourrait ajouter aussi hors géothermie l'association air et pompes à chaleur).

Selon l'évolution concurrentielle, des coûts des combustibles fossiles, on peut voir un développement entre **2 et 7 Mtep**.

La deuxième utilisation, haute température, ne s'applique pratiquement que dans les DOM TOM avec notamment en Guadeloupe: 4.2 MWe à ce jour (21 GWhe en 2000) et une extension prévue à 15 MWe.

Des recherches (en Alsace) pourraient donner des apports identiques, mais ceci reste insignifiant (projet Alsace 6 MWe). Au total la **géothermie électricité ne devrait pas dépasser 1 TWh**.

### **L'éolien**

La production mondiale est encore limitée: 10 TWhe (0.02% de la production électrique) mais, c'est l'énergie renouvelable qui relativement se développe le plus. L'éolien connaît en effet une grande faveur et est maintenant passé dans l'ère industrielle.

Grâce à une forte subvention à l'achat du courant électrique (8.38 c€/kWh en France les 5 premières années puis en décroissance, et plus dans d'autres pays d'Europe) il

poursuit son développement. Il connaît un fort développement chez nos voisins Allemands et Espagnols, ainsi qu'au Danemark.

En Allemagne, par exemple en 2003, 14.000 MWe sont ainsi installés qui ont fourni environ 20 TWh soit un taux moyen de marche de 1430 heures par an ( facteur de charge 16.3 %) Ce développement peut se justifier par le fait que l'éolien se substitue le plus souvent au charbon.

La France, tenue par la directive européenne de fournir en 2010, 21 % de son électricité par des sources renouvelables, s'engage dans cette voie, bien que la production éolienne ne diminue pas ses émissions de gaz à effet de serre puisqu'elle se substitue au nucléaire. Cela conduirait à installer entre 7.000 et 10.000 MWe d'éoliennes pour 2010.

En supposant un taux moyen d'utilisation optimiste de 25 % soit 2.200 heures par an, l'énergie produite serait donc comprise entre **15 et 22 TWhe**.

En dehors de l'aspect coût qui restera prédominant sauf si les coûts des autres énergies augmentent d'au moins un facteur 2, le point le plus important qui limitera l'éolien est associé au caractère intermittent et relativement imprévisible à moyen terme, de la production. En production d'électricité, il faut prévoir des moyens de substitutions. De façon simplifiée il faut considérer qu'à chaque MWe éolien installé doit être prévu 0.9 MWe d'une autre source d'appoint disponible, souple, contrôlable qui produira dès que l'éolien sera indisponible (les  $\frac{3}{4}$  du temps) donc environ 3 fois plus d'énergie. Ceci se traduit par des frais d'investissements, d'exploitation, mal rentabilisés sur ces autres sources. Ces dernières étant ainsi utilisées à temps partiel le coût est encore plus pénalisé surtout si pour ces autres sources la dépense investissement est prépondérante.

Une forte présence de l'éolien, tant que la question du stockage de l'énergie électrique ne sera pas résolue à l'échelle industrielle, ne se conçoit qu'avec un maintien proportionné, donc fort, des combustibles fossiles du fait de la faible part de l'investissement et à contrario de la part prépondérante du coût combustible. Le nucléaire pourrait techniquement faire face à une forte présence d'éoliennes et aux fluctuations de puissance associées, mais la part des investissements étant prédominante les répercussions sur le coût seraient très importantes.

## **Solaire**

L'énergie solaire sous forme thermique ou photovoltaïque est la plus évidente, la plus sympathique.

A ce jour la production mondiale est estimée à 10 Mtep en basse température (0.1 % ) et environ 1TWh en photovoltaïque (0.002%) En France ce chiffre serait de 0.02 Mtep donc négligeable.

Très diluée, elle reste trop chère au niveau photovoltaïque et négligée en France pour la production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage.

Le solaire chaleur peut jouer certainement un rôle important pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage. Il faut le développer et il n'est pas exclu de fournir par cette voie une partie significative des besoins en confort thermique. Si on admet que la moitié des logements et du tertiaire peuvent voir 70% de leur eau chaude sanitaire fournie par cette source, cela représente 2.5 Mtep.

L'apport eau chaude chauffage ne peut concerner que moins de logements (10%: essentiellement dans la maison individuelle du fait des surfaces nécessaires avec en association peut être la climatisation solaire) et pour ceux ci couvrir 60% des besoins. Ceci donne 3.5 Mtep.

**Au total le solaire thermique peut donc fournir 6 Mtep en 2050.**

Le solaire électricité (photovoltaïque) en dépit des progrès continus et attendus dans les capteurs, devrait encore, à moyen terme, rester plus cher avec l'inconvénient associé au caractère intermittent déjà cité pour l'éolien. Cette intermittence est accentuée car c'est en hiver où on trouve les besoins maximums que le soleil est le plus rare.

Néanmoins le photovoltaïque devrait se développer sur des marchés complémentaires dans nos pays et outre mer

- celui de l'enveloppe (toit ou façade) du bâtiment en Face Sud avec production simultanée d'électricité et d'eau chaude ( voir ci dessus).
- dans les zones dépourvues de réseau électrique (montagnes, îles).

Le développement du photovoltaïque sera surtout lié à une collaboration Nord Sud, aux exportations de certains équipements, ou aux transferts de certaines technologies. Des millions de générateurs autonomes remplaceront des réseaux pour un coût inférieur soit à la situation actuelle (kérosène, piles, bougies) extrêmement coûteuse, polluante et mauvaise, soit à la création de réseaux. Les pays riches apporteront les prêts sous forme de micro crédits déclenchant des processus d'autofinancement. Les habitants des pays en développement assureront l'essentiel du coût de l'investissement. Nous retenons donc que pour la France le développement des panneaux conjoints eau chaude électricité devrait démarrer bientôt.

### **Récapitulatif : les Energies Renouvelables. Que peut-on prévoir dans l'avenir ?**

En France, à ce jour, les seules sources renouvelables significatives hors grande hydraulique sont l'utilisation des déchets urbains, du bois récolté et déchets bois. Le total représente: 4 TWh électrique et 10.2 Mtep en thermique directe. Le solaire et l'éolien sont encore négligeables. Le total hors hydraulique représente 4.4 %de l'énergie produite et cela donne 12 % avec l'hydraulique (chiffrés à la production).

Comme vu ci dessus, le développement des renouvelables passe surtout par le thermique direct.

Ceci correspond à un accroissement de la biomasse par une meilleure utilisation du bois, des déchets ménagers, industriels et agricoles, par un accroissement du solaire thermique et de la géothermie basse température et un appel important aux pompes à chaleur.

On trouverait ensuite pour la mobilité un développement des biocarburants sous réserve de progrès et de sélection de bonnes filières, mais celles ci seront largement insuffisantes et pour se dégager partiellement du pétrole il faudra fortement développer l'électricité pour les transports (sous réserve que cette électricité ne soit pas produite par des combustibles fossiles).

Pour l'électricité un appoint non négligeable peut aussi être apporté en complément par ces mêmes sources thermiques ( bois et déchets ) et la géothermie, si possible en cogénération. Reste la question de l'éolien. Comme indiqué ci dessus, le caractère intermittent limite sa pénétration surtout si la base de la fourniture électrique est le nucléaire.

L'avenir proche à 10 ans peut être esquissé à partir du Livre Blanc qui propose pour 2015

- a) Pour le thermique + 50% soit +5 Mtep ( passage de 11 à 16 Mtep): surtout solaire et bois.
- b) Pour la production d'électricité porter à 21 % la part du renouvelable dès 2010  
Ceci pourrait être obtenu avec Eolien 15 à 20 TWh, Hydraulique + 2 à 8 TWh, Biomasse + 2 à 6 TWh, Déchets + 1.5 à 5 TWh, Géothermie, Solaire et autres : moins de 1 TWh.

Le futur éloigné 2050 (objectif diviser par 4 les rejets de CO<sup>2</sup>)

Le tableau ci dessous récapitule un remontage envisageable des renouvelables pour 2050. La croissance globale des renouvelables est de 150 %, la seule croissance hors hydraulique est de 330%.

L'importance des renouvelables ne peut être indépendante de l'évolution des autres sources.

1. nous nous plaçons dans l'hypothèse où le coût des combustibles fossiles ramené à la référence pétrole aura dépassé les 75 à 100 \$ le baril. En effet si un lancement de filière énergétique est possible hors concurrence, avec des aides importantes comme actuellement sous forme d'aides à l'investissement ou de rachat de l'électricité, la pénétration à grande échelle ne se conçoit qu'en dehors de ces aides.
2. pour l'électricité se pose comme déjà indiqué le problème de la continuité de la fourniture hors stockage que nous ne voyons pas à grande échelle à cette date. Il faut donc aussi tenir compte des autres sources notamment celle qui fournira la base que ne peuvent assurer certaines renouvelables.

Cette question se pose particulièrement pour l'éolien. Ici nous nous sommes placés dans la continuité française avec un nucléaire important en fourniture de base (ce pourrait être aussi en semi-base).

Par contre si l'option nucléaire est abandonnée et donc que la base électrique repose sur le gaz ou le charbon, il devient possible d'augmenter la part de l'éolien à 88 TWh, mais il est clair que cette option est incompatible avec l'objectif de réduction des rejets de CO<sup>2</sup>, sauf séquestration du CO<sup>2</sup>.

Nota : Certains tablent sur le succès de la séquestration du CO<sup>2</sup>. Cette séquestration ne pourrait s'appliquer que sur de grandes installations centralisées comme celle affectées à la production d'électricité. Cette séquestration ne sera jamais totale, à la fois parce que le rendement de la capture du CO<sup>2</sup> ne saurait être de 100 %, et parce que le transport des combustibles fossiles (surtout le charbon et le gaz) est lui-même source de CO<sup>2</sup>. Globalement, avec une « efficacité » de la séquestration de 80 %, les rejets de CO<sup>2</sup> liés à la production de 400 TWh d'électricité à partir de charbon atteindraient, à eux seuls, 20 Mt de carbone contenu dans le CO<sup>2</sup>. Ceci laisserait bien peu de rejets possibles pour les autres usages.

|                        | 2002 | 2050 |
|------------------------|------|------|
| <u>ÉLECTRICITÉ TWh</u> |      |      |

|  |                                      |                |
|--|--------------------------------------|----------------|
| Hydraulique  | 70                                   | 70             |
| Éolien   |                                      | 22             |
| Photovoltaïque   |                                      | 1              |
| Bois et déchets  | 4                                    | 10             |
| Divers (géothermie...)   |                                      | 1              |
| <b>Electricité Renouvelables<br/>TWh</b><br><b>Total électricité en 2002</b>           | <b>74 TWh</b><br>(14 %)<br>525 TWh   | <b>104 TWh</b> |
| <b>CHALEUR MOBILITÉ<br/>Mtep</b>   |                                      |                |
| Solaire chaleur  |                                      | 6              |
| Géothermie   |                                      | 7              |
| Bois/ Déchets  | 12                                   | 25             |
| Biocarburants  |                                      | 10             |
| <b>Chal. Mob.<br/>Renouvelables. Mtep</b><br><b>Total Chaleur Mobilité en<br/>2002</b> | <b>12 Mtep</b><br>(9,7%)<br>123 Mtep | <b>48 Mtep</b> |

---