

Les énergies renouvelables pour faire quoi ?

Bernard Devin (Global Chance, consultant indépendant)

Les énergies renouvelables ramènent au mythe de l'âge d'or où l'homme n'était pas le prédateur de la nature. Pourtant le « village médiéval », cité par JL Wingert, qui fonctionnait « à l'huile de bras », à la force du cheval et des bœufs, de l'eau et du vent, a dû faire sa mutation vers la société moderne. Notre société bute maintenant sur de semblables limites d'approvisionnement énergétique, perturbations climatiques en plus, et finitude de l'espace planétaire. Revenir aux renouvelables en vivant différemment ? Problème de choix de société et de décision politique consensuelle ? Quelles sont les « billes » que nous pouvons jouer ?

L'exercice limitatif proposé dans cet article est de voir ce que les projections du scénario « de référence » de l'AIE affichent, ou non, de vraisemblable pour les Énergies Renouvelables (ER) en 2030 et ce qu'il faudrait en faire.

Tout scénario est d'abord un exercice destiné à stimuler la réflexion : ce que nous ferons librement ici. La physique et les nombres fixent des rapports et des ordres de grandeur que nous noterons au passage : on ne saurait aller contre. Mais, du possible au réel, reste le long chemin de la décision et de l'accomplissement, sans doute la question majeure de notre époque. Plusieurs auteurs contemporains commencent à s'y pencher, dont JM Jancovici et A. Grandjean (*Le plein s'il vous plaît* au Seuil), mais aussi dans le numéro de *Futuribles* 315 de janvier 2006 qui commente les différents scénarios de SHELL. Ces auteurs ont en commun la vision d'un nécessaire « État fort » pour faire prendre à temps les options indispensables ; leurs « futurs » seraient ils *a priori* perçus comme impopulaires ?

Il n'y aurait pas lieu de se réfugier dans un tel schéma si nous savions illustrer les « futurs énergétiques possibles » d'une vision sociologique acceptable de la société nouvelle que le « mur énergétique et le climat » vont nous imposer au cours de ce siècle.

JL Wingert. (JLW – *La vie après le pétrole* – Éditions Autrement 2005 – pp 126+) rappelle donc l'impasse énergétique des cités-état du moyen-âge, fondées exclusivement sur le travail humain *et les énergies renouvelables*. C'est aussi un « conte philosophique ». Cette description d'ingénieur est captivante à la fois par la visualisation de l'interdépendance majeure économie-énergie, par l'atteinte de la limite énergétique « renouvelable » locale et par les impacts politiques et sociétaux qui s'ensuivent. Mais ce « conte » n'est pas moins éclairant par les trois seules voies possibles de sortie de crise qu'il reconnaît : l'amélioration de l'efficacité énergétique, la création de nouvelles filières locales, et enfin le prélèvement de ressources à l'extérieur – dont l'époque des découvertes et des conquêtes – coloniales – a été l'une des conséquences.

Si l'aspect décisionnel, politique et pratique, en direction d'un « futur possible » est un défi majeur qui sort du cadre de cet article, limitons-nous à la question préalable des « futurs possibles » ; elle passe d'abord par l'élimination des « futurs impossibles »... dont celui du scénario WEO 2004. Allons y donc, le temps presse.

AIE 2030 : combien de renouvelables ?

Le scénario « de référence » de l'AIE est connu et présenté ailleurs dans ce cahier (*voir Stratégies énergétiques : l'impasse des politiques actuelles*). L'objectif de 2 226 Mtep – hydraulique comprise – de sources renouvelables en 2030, est-il possible ? La réponse est certainement *oui*, c'est même une valeur minimale.

Jean Louis Bal et Bernard Chabot ont très précisément illustré la dynamique du secteur dans *Futuribles N° 315* de janvier 2006 ; les différents *Baromètres des énergies renouvelables* publiés tout au long de l'année par *Systèmes*

Solaires - EurObsev'ER donnent des informations très précises pour les 25 pays de l'Union Européenne (UE). Nous pouvons donc nous baser sur des données récentes, tout en faisant le rappel d'une étude antérieure du début des années 90 (*Mobiliser les énergies renouvelables : combien ?, comment* par B. Devin et B. Dessus – Revue de l'Énergie 435 nov-déc 1991). Dans cette étude, le « potentiel accessible » des énergies renouvelables avait été chiffré pour l'horizon 2020 dans les conditions de compétitivité de l'époque, et avec une estimation de la demande réelle solvable de l'époque (Tableau 1). La technologie ayant beaucoup progressé – et la référence de compétitivité, le prix du pétrole, ayant fait les bonds que l'on sait, les valeurs affichées sont nécessairement aujourd'hui sous estimées par rapport à 2030.

Tableau 1 - Contribution potentielle minimale des énergies renouvelables à l'horizon 2020

B. Devin, B. Dessus (Revue de l'énergie n° 425 nov-déc 1991)

Mtep	Total « Nord »	Total « Sud »	Total monde	Part %
Hydro	755	560	1 315	26,4
Géo	23,3	15,7	39	0,8
Solaire	120	350	470	9,4
Vent	100	45	145	2,9
Bois com	560	990	1 550	31,1
Bois nc	0	500	500	10
Culture	190	160	350	7
Déchets	205	415	620	12,4
Total ER	1953	3036	4889	100

Le déploiement des Énergies Renouvelables n'est donc pas un problème d'existence de la ressource mobilisable, mais plutôt une question de « mobilisation » de cette ressource à partir de l'action du marché et/ou de politiques volontaristes.

Les énergies renouvelables pour faire quoi ?

Si la question se pose, la réponse n'est pas dans la part de rêve bucolique qui nous replacerait dans le « village médiéval ». Ce n'est pas pour le plaisir : les ER ne sont ni moins chères, ni plus commodes (sauf cas « isolés » mais intervenant peu dans le bilan mondial) ni sans inconvénient, ni toujours plus acceptables, que ce bon vieux pétrole du Moyen Orient, ni que ce gaz « naturel ». Il n'est que d'entendre les réactions hostiles aux champs éoliens ou aux grands barrages hydrauliques pour en prendre conscience.

Mais à quelles fins voulons nous développer ces ER ? pour faire quoi ? ne pas manquer d'énergie à l'avenir ? sauver la planète ?

Il y a probablement, au delà des « traités internationaux » – bien incomplets – un consensus profond entre les habitants de cette planète pour *tenter de faire en sorte que – expression « politique » s'il en est – l'on puisse développer et maintenir une abondance énergétique accessible à tous, en passant sous le « couperet » de la contrainte climatique*. Une bonne question « d'ingénieurs », puis de « politiques » pour passer aux actes.

Quels objectifs faut-il atteindre ?

Maintenir la satisfaction de la **croissance de la demande de « services » procurés par l'énergie** d'une part ; faire en sorte que les **émissions de gaz à effet de serre (GES) amorcent une décroissance durable**, d'autre part.

La pénétration effective des sources « non émissives » (NE) dans le bouquet énergétique mondial se fait à l'occasion de la création de nouveaux équipements, ou du remplacement des anciens qui deviennent obsolètes. C'est la logique économique. On ne **construit des équipements supplémentaires** productifs qu'en fonction d'une *demande croissante* (solvable, ou aidée) et l'on **renouvelle des équipements obsolètes**, un peu chaque année, quand ils ont été amortis. 25 à 40 ans sont des durées de vie courantes pour les équipements de transformation de l'énergie primaire des filières *charbon, pétrole et gaz* – qui sont les filières dont on souhaite se libérer. La croissance des TPES (Total Primary Energy Supply) étant chiffrée autour de 2 % par an en 2010, c'est donc un enjeu annuel de **200 Mtep** de capacités supplémentaires et de **350 Mtep** (25 ans de durée de vie : renouvellement annuel de 4 %) d'équipements qui est ouvert en ordre de grandeur annuel.

Hormis d'improbables « casses » ou démantèlements d'installations non amorties pour y substituer des installations « renouvelables », c'est seulement *l'augmentation de la demande à satisfaire* et l'activité de *renouvellement des équipements anciens* qui offre le champ d'introduction des renouvelables, en économie de marché.

Quel choix faire pour ces « équipements annuels » ?

Il est assez simple de modéliser les chiffres proposés par le scénario WEO 2004 sur un tableur de manière à reproduire les valeurs données, ainsi que les émissions qui y correspondent. S'agissant d'un exercice sur la maîtrise des émissions de GES, il est justifié de s'intéresser directement au ratio « non émissifs » / « émissifs », (NE/E) puisque les renouvelables n'ont pas de monopole d'émettre peu (ou pas du tout), l'hydraulique et le nucléaire, les systèmes à séquestration du CO² sont également dans ce cas. Si les renouvelables « peuvent tout faire », on n'aura pas besoin des autres, évidemment.

Il est commode de faire cette modélisation en introduisant quelques paramètres ajustables qui représentent :

- La croissance annuelle de la demande : C %
- Le taux de renouvellement (ou de mise à l'arrêt) des anciens équipements : R %
- La part actuelle des sources « non émissives » dans le bouquet énergétique : P %
- L'effort d'efficacité énergétique annuelle éventuel : Eff % (non utilisé ici)
- Le « **taux de pénétration** » des sources « non émissives » dans les constructions ou renouvellements annuels : **TRN %**

Ce paramètre, **TRN %**, est un paramètre de « politique énergétique ». Il est **mesurable** : en un lieu et pour un « bouquet » donné, il permet de montrer quels sont spécifiquement les efforts faits, ou « à faire », et de se situer par rapport à une feuille de route.

À titre d'exemple, la Figure 1 représente 3 exercices de simulation des émissions de GES, sur la base de la **TPES** (Total Primary Energy Supply) du scénario WEO 2004.

Tableau 2 – Paramètres représentatifs des courbes de la Figure 1

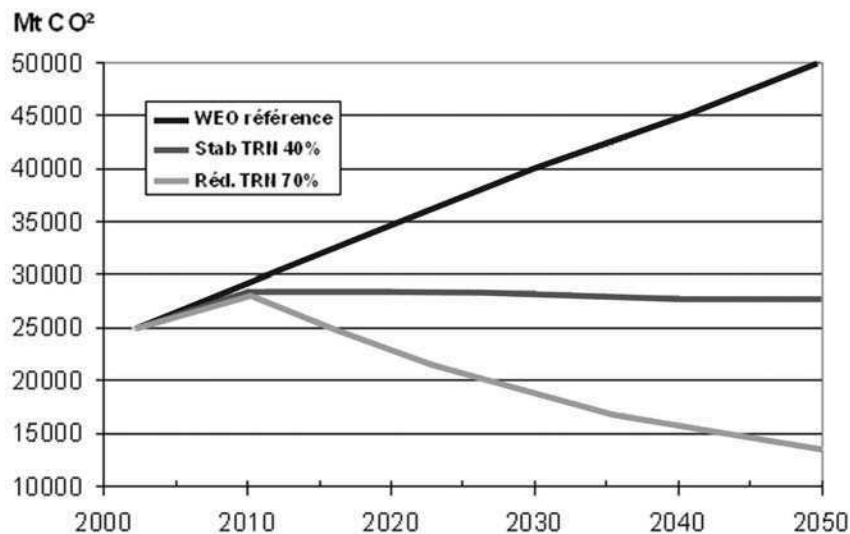
R % = 4	C %*	Eff %**	TRN %	Mtep add NE annuel	Caractéristique
WEO 2004	1,7	0	6	40	Maintien taux P % des NE – les émissions croissent
WEO stabilisation	1,7	0	40	240	Stabilisation des émissions
WEO décroissance	1,7	0	70	350-400	Décroissance forte

Dans ce tableau, R % a été pris arbitrairement à 4 % ; la valeur du TRN % qui permet de reproduire les émissions « affichées » lui est liée et varie en sens inverse. Ce qui reste constant est le nombre de Mtep annuels qui doivent être « mis en place » pour chacun des cas examinés.

La première courbe est la représentation des émissions du scénario de référence 2004 de l'AIE. Les intrants « non émissifs » sont au niveau de 6 % des ajouts et renouvellements. La part des NE diminue. Les émissions croissent.

La courbe suivante est l'exercice de **stabilisation** des émissions. On a augmenté le taux d'introduction des sources « non émissives » (dont les « renouvelables ») au-delà de ce qui est proposé dans le scénario de l'AIE. Cette proportion dépendrait donc d'un acte de « politique énergétique ». Il faudrait introduire 40 % de NE dans les ajouts et renouvellements, soit autour de **240 Mtep annuelles**.

Influence TRN % sur scénarios WEO 2004



La troisième courbe est l'exercice de **décroissance** : il faudrait aller beaucoup plus loin, sur la base des TPES du scénario AIE : que les nouvelles introductions ou remplacements soient à 70 % « non émissives » et entre 350 à 400 Mtep par an.

Est-ce possible avec les énergies renouvelables ? Que peuvent-elles s'adjuger dans ces montants ?

Ces besoins se réduiraient évidemment si l'efficacité énergétique globale – « de la source au service » était améliorée de Eff % par an, un paramètre non utilisé dans cet article, mais que l'AIE a introduit au niveau de 0.5 % dans *Alternative Policy Scenario Projections*, sans influence réellement décisive sur les émissions.

Que peuvent apporter les renouvelables de 2010 à 2030 ?

Nous avons vu que le point clé est la capacité de « substitution annuelle », puisqu'il n'y a pas de problème de « ressource primaire ». Pour que les émissions décroissent, il est évident que les « non émissifs » doivent être introduits dans le bouquet mondial, en volume, plus rapidement que ne croît la demande énergétique. Enfin la « substitution » doit être « vraie » Qui dit substitution invite à raisonner par branches, et en termes de compétition effective.

- *Solaire thermique, bois de chauffage, géothermie* : substitutions dans le domaine de l'habitat – et de nombreux usages collectifs ou industriels.
- *Éolien, petite et grande hydraulique, photovoltaïque* : dans le domaine de l'électricité issue de sources « émissives ».
- *Carburants issus de la biomasse* : transports, tous usages mobiles d'énergie.

Dans ce qui suit, nous raisonnerons sur les quantités de Mtep qui peuvent être introduites chaque année, en termes de substitution aux énergies « émissives », puisqu'il s'agit de les remplacer et de faire diminuer les émissions de GES. Nous évaluerons le Potentiel de Substitution Annuelle (PSA) d'une filière donnée, en portant attention aux équivalences qui ne sont pas nécessairement celles admises dans les statistiques énergétiques mondiales. Ce PSA pourra ensuite être comparé aux repères du Tableau 1.

Hydraulique : la « grande hydraulique » est une réelle substitution possible au charbon, au gaz et au pétrole pour la production d'électricité, en dehors des pays industrialisés, déjà largement équipés. Le gisement mondial accessible et substituable que nous avons estimé dans l'étude citée était de 1 215 Mtep. Il s'agissait d'équivalent à la production de la même quantité d'électricité par des sources thermiques conventionnelles au rendement de 35 %, (alors que les statistiques officielles ne la comptent que pour son équivalent thermique en énergie finale). L'AIE ne dépasse pas le chiffre de 367 Mtep (finales) dans son scénario alternatif. Les chiffres qui se retrouvent dans le papier de M. Chirouze dans ce numéro, en accord avec l'estimation 1997 de la revue *Hydro Power and Dam*, ne remettent pas en cause l'estimation de l'AIE. En résumé on peut tabler sur un passage de 276 (2010) à 367 (2030) Mtep soit 91 Mtep (finales) supplémentaires ou 260 Mtep primaires substituables. On pourrait atteindre le niveau de 367 Mtep finales installées ou 1 048 Mtep primaires substituables en fin de période.

Parmi les « bonnes raisons » de ne pas accéder au potentiel plus élevé que nous avons estimé, sont évoqués le coût, les contraintes environnementales, et la difficulté d'exporter à longue distance des énergies dont l'utilisation

dans leur périmètre est limité, faute de population et de besoins. Délocalisations énergétiques ou exportation par de nouveaux vecteurs sont des voies à explorer pour le futur, mais leur impact n'est pas prévisible d'ici 2050.

La Grande Hydraulique nous propose donc un potentiel de substitution annuelle PSA de **13 Mtep** par an sur la période.

La « petite hydraulique » ne souffre pas de ces limitations. Son ampleur est déjà au niveau de 10 Gw installés en Europe (Baromètre EurObserv'ER 2004) que l'on considère comme presque totalement équipée. Le rapprochement avec l'équipement « grande hydraulique » européen de 130 Gw soit 7.7 %, donne une valeur haute pour le potentiel mondial accessible. La « petite hydraulique » pourrait donc jouer au niveau de 20 Mtep substituables sur l'ensemble de la planète, soit un PSA de **1 Mtep**.

L'accroissement potentiel annuel substituable sur la période 2010-2030 serait donc autour de **14 Mtep par an**.

Nous avons estimé plus de 20 Mtep annuels d'hydraulique « substituable » (sous toutes réserves d'acceptabilité) dans notre étude, il n'y a donc pas de divergence majeure.

Géothermie : Le WEO est peu disert sur les *usages thermiques*, il mentionne cependant 3 Mtep en 2002 et une croissance du secteur « géothermique » d'un facteur 3 entre 2002 et 2030, tout en notant manquer totalement de données sur la Chine, notamment. Ceci ferait au bas mot 10 Mtep pour la chaleur géothermique comme potentiel en 2030. Le Congrès Mondial de 2005 en Turquie a confirmé ces ordres de grandeur avec 4.2 Mtep en 2004.

Les utilisations avec pompes à chaleur sont en forte croissance en Europe, mais n'interviennent réellement en substitution que pour la part prélevée au sol. Ce chiffre serait à préciser. En tout état de cause, les potentiels de substitution annuelle supplémentaire sont liés au rythme de développement de la filière et l'on aura tendance à tableur sur une croissance linéaire.

La croissance du secteur est rapide, plus rapide que prévu dans les pays de l'UE, avec une projection de capacité de 10 GW thermiques en 2010, soit le double de l'indicateur de référence européen. L'accroissement annuel a été de 630 MW par an, ou 2.5 TWh (pour usage estimé de 4000 heures par an), c'est-à-dire 0.22 Mtep. Une extrapolation grossière au pro rata Europe/Monde de 17 % dans cette filière conduirait à un **PSA de 1.3 Mtep**. Ce chiffre n'est pas incohérent avec le « facteur 3 » avancé par l'AIE pour 2030.

Pour la *production d'électricité*, le WEO projette 167 TWh en 2030, dont la capacité de déplacement de produits fossiles ne saurait dépasser son « équivalent charbon » autour de 4 TWh à la Mtep soit 42 Mtep. Nous avons estimé un potentiel géothermique de 39 Mtep pour 2020. La puissance mondiale installée (WEO) est de 13 GW en 2010, (pour 1 GW en Europe, soit un ratio de 7.7 %), avec une progression de la puissance installée estimée à 12 GW entre 2010 et 2030, soit 0.6 GW par an dans le monde. Le fonctionnement retenu par l'AIE est proche de 7000 heures par an. Il s'agirait donc de 4.2 TWh ou 1 Mtep. Un **PSA de 1 Mtep** peut donc être retenu pour cette filière. Le bilan européen EurObserv'ER fait état d'un équipement au rythme de 20 MW par an d'ici 2010, soit sensiblement moins que la croissance mondiale.

Solaire : c'est le gros point de rêve et de discussion. À l'horizon 2050, il ne paraît pas raisonnable de considérer les « satellites » solaires de P. Glaser, ni les gigantesques centrales électriques dans les grands déserts mondiaux – en particulier faute de « vecteur » disponible. Restent les usages thermiques dans l'habitat (ce sont eux qui ont été chiffrés dans l'étude citée 470 Mtep en 2020), et le Photovoltaïque.

Solaire Thermique

Puisque nous disposons de quelque recul sur ces projections, qu'en est il des 20 Mtep proposés pour l'Europe de l'Ouest en 2020 ? – le chiffre de 35 Mtep est donné dans l'exercice « amélioré » de l'AIE pour 2030 au niveau Mondial, ce qui semble très réservé. Le « Baromètre européen des énergies renouvelables EurObserv'ER » ne fournit pas de chiffres en Tep mais en mètre carrés installés, c'est beaucoup plus « visible », mais cela masque un peu la petitesse de la chose. Fin 2004 l'U.E. des 25 totalisait 15 mm² de capteurs installés, soit une puissance thermique de 10753 MW.

La productivité : Sous nos latitudes, un mètre carré de capteur basse température opère avec un rendement voisin de 50 % et peut produire 500 kWh utiles par an. Les 15 mm² installés en Europe « valent » donc à ce jour 7.5 TWh ou 0.65 Mtep. L'objectif du livre blanc de 100 millions de m² vaudrait 4 à 5 Mtep, nous sommes loin du potentiel estimé. Le rythme d'installation annuel est seulement de 1.6 à 2 mm² en Europe qui conduisent à 0.8 Mtep substituables. Systèmes Solaires N° 138, dans son baromètre estime que l'Europe représente à peu près 10 % du marché mondial.

Ces chiffres conduiraient à un potentiel de substitution de **8 à 10 Mtep par an**. Ce rythme d'équipement est probablement inférieur aux possibilités réelles d'utilisation, mais les latitudes plus ensoleillées ont beaucoup moins de besoins de chaleur...

Une question est de savoir à quoi est substituée cette chaleur solaire ? Si c'est au chauffe-eau électrique et au chauffage électrique en France, il n'y aura pas beaucoup d'impact sur les émissions, compte tenu du parc nucléaire. Un meilleur point si c'est au chauffe-eau à gaz et au chauffage de l'habitation fioul ou gaz. Admettons qu'il en soit ainsi dans le monde et conservons ce potentiel de substitution. **PSA de 8 à 10 Mtep.**

Solaire photovoltaïque

C'est la filière en croissance la plus rapide dans les pays du Nord, toute rationalité mise à part. Elle s'est développée dans un contexte pourtant rationnel, celui de l'alimentation électrique des usages de petite puissance, décentralisés, où elle est largement compétitive. Ces besoins ont été largement couverts, au Nord comme au Sud (relais hertziens, signalisation routière ou ferroviaire, systèmes de sécurité, et même bornes de péage en ville...).

Le grand défi du milliard d'habitants de la planète sans aucun accès aux énergies modernes persiste : leur équipement, pour l'essentiel (éclairage, télécom, froid), pourrait être fait de panneaux solaires. 50 Watts-crête par foyer de 5 personnes représenteraient 10 GW-crête. Avec une production mondiale de panneaux solaires en 2005 de 1.7 GW-crête, on est bien dans les ordres de grandeur réalistes pour relever un tel défi. Cette « substitution » serait sans doute plus importante que la simple équivalence énergétique qu'elle représente, autour de 12 TWh par an, une fois les équipements réalisés. Les systèmes PV décentralisés ne déplaceraient pas de l'électricité de 'réseau' à hautes performances, mais en général des générateurs diesel surdimensionnés, et donc opérant dans de très mauvaises conditions de rendement énergétique. Pour ce type d'applications, à réaliser dans le contexte des engagements du SMDD et des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), on peut estimer une capacité de substitution ultime de 5 Mtep. C'est finalement modeste, même s'il s'agit d'une tâche essentielle. Si cette tâche était effectivement menée à bien entre 2010 et 2030, le **PSA serait de 0.25 Mtep par an.**

Mais la dynamique du développement PV repose davantage sur son insertion massive, au Nord, sur les toitures et façades pour déplacer de l'électricité de réseau, notamment de la part des gouvernements qui ont choisi l'option de sortie du nucléaire. Encore mineure par rapport à l'éolien, la filière photovoltaïque solaire requiert aussi des dispositions de réseau capables d'estomper les intermittences, elle s'inscrit dans la limite des 20 % de production fluctuante acceptable sur un réseau.

Jl. Bal et B. Chabot caractérisent la filière par un décalage de 10 à 15 ans par rapport à la filière éolienne, Le groupe de travail de la Commission Européenne PV-TRAC, qu'ils citent, projette une puissance installée de 1 000 GW en 2030 (capables de substituer 1 500 TWh ou 375 Mtep (un **PSA de 19 Mtep/an**). À 50 GW installés par an, en moyenne, on serait à plus de 25 fois la capacité de production actuelle de cellules.

Les producteurs mondiaux totalisent une capacité annuelle de 1.7 GW-crête, en forte croissance, mais pour de simples questions de budgets « d'aide au marché » consentis par les gouvernements, on voit mal comment une telle croissance pourrait se poursuivre longtemps sur la même pente. Il faudrait de plus oublier les questions de coût des systèmes associés et même la question de la disponibilité du silicium « photovoltaïque ».

En regard, l'AIE affiche 119 TWh en provenance de l'énergie solaire en 2030, ce qui correspondrait à un parc en service de 75 GW-crête (capables de substituer 28 Mtep). L'hypothèse d'un *accroissement moyen* de 3.4 GWc de la puissance installée par an sur la période correspond au double de la capacité industrielle actuelle, mais reste un ordre de grandeur optimiste envisageable au milieu de la période. Avec une productivité de 1 500 heures par an, il s'agirait donc de 5 TWh supplémentaires par an conduisant à un **PSA de 1.25 Mtep** : (ici en effet la substitution se fait sur un réseau comportant des systèmes raisonnablement performants, comptés pour 4 TWh par Mtep)

Entre l'option « hyperdynamique » à **29 Mtep/an** et l'option « réaliste conservatrice » dont les usages décentralisés et toiture se cumulent pour un **PSA de 1.5 Mtep**, gardons la fourchette ouverte.

Solaire passif – Habitat bioclimatique

Non pris en compte ici, ce gisement considérable est une **substitution potentielle majeure aux systèmes émissifs** par réduction de la demande énergétique. Nous les rangerons dans *l'efficacité énergétique*, non comptabilisée dans cet article.

Éolien : un autre « grand espoir ». En phase de démarrage de son expansion, la filière doit atteindre la maturité et la compétitivité avant 2010. Les puissances installées sont considérables, 40 000 MW en 2004, sur une courbe de croissance exponentielle. Les 28,57 GW installés en Europe fin 2003, augmentés de la moitié des installations 2004 (5,86 GW) soit au total 31.43 GW ont produit 54.2 TWh en 2004. On constaterait donc une durée effective de fonctionnement de *1 725 heures annuelles* de production nominale, au lieu des 2 500 heures « théoriques ». Ceci indiquerait qu'il y a bien une certaine difficulté technique à « vendre » sur le réseau la totalité du productible : fluctuations de la source, de la demande (profil journalier) et présence de capacités modulables : TAG, lacs, éclusées, et classique non nucléaire, ce dernier étant peu modulable. L'énergie finale produite en Europe serait donc substituée aujourd'hui à 13.6 Mtep de produits émissifs (4 TWh/Mtep). L'impact réel sur les émissions est

une question ambiguë, tout comme la réponse. La poussée éolienne a été soutenue par une volonté politique forte de « sortie du nucléaire » de la part de plusieurs pays membres.

On trouvera dans le N° 165 de *Systèmes Solaires* deux articles à ce sujet. Un graphique montre que les fluctuations de la demande au cours de la semaine peuvent atteindre une amplitude de 45 000 à 65 000 MW (France), soit 18 % autour de la valeur moyenne. Le réseau dispose de moyens de production pour s'accommoder de ces fluctuations. On estime généralement que 20 % d'énergie éolienne couplée à un réseau constituent une limite pratique.

C'est sur cette base que le potentiel accessible substituable avait été évalué à 145 Mtep pour 2020 dans l'étude citée. (580 TWh). Il est chiffré à 559 TWh pour 2020 dans le scénario de référence de l'AIE et à 929 en 2030. L'AIE affiche donc un accroissement de 678 TWh entre 2010 et 2030 (170 Mtep), un triplement de la puissance installée. En suivant l'AIE on peut donc estimer pour l'énergie éolienne un PSA de 8.5 Mtep par an.

Mais cette estimation semble très sous estimée compte tenu de la dynamique du secteur. Dans les projections de marché de BTM Consult, cité par JL Bal et B. Chabot dans *Futuribles 315* la capacité industrielle croît de 15 % par an. Le marché pourrait atteindre 29 GW par an en 2014, soit une production supplémentaire annuelle de 72.5 TWh (un PSA de 20 Mtep).

Si l'on souhaite chiffrer la « limite » de 20 %, qui représenterait 6 300 TWh en 2030, il faudrait imaginer que 300 TWh sont ajoutés aux réseaux chaque année (75 Mtep), elle correspondrait à une capacité de production de 120 GW annuels (pour 29 GW projetés par BTM autour de 2014). L'extrapolation du taux de croissance de la filière conduirait à une telle capacité vers 2025. Il n'y a pas de fossé d'ordres de grandeur, et la filière présente certainement un très grand potentiel.

Compte tenu de l'accroissement de la compétitivité de la filière, par ses progrès technologiques et la hausse soutenue du brut, nous adopterons l'estimation d'un **PSA de 20 Mtep**.

Biomasse et carburants de substitution

Bois énergie

La consommation du *bois-énergie* en Europe a été estimée pour 2004 à 55 Mtep d'énergie primaire (Systèmes solaires N° 169 octobre 2005). Ses usages en chaleur directe, en production d'électricité, ou en co-génération sont nombreux et diversifiés. La Finlande en est le champion avec 1.39 Tep par habitant en 2004, principalement dans des applications décentralisées. La production brute d'électricité à partir du bois est chiffrée à 35 TWh dans l'UE en 2004, pour 207 TWh dans le monde selon le scénario de référence. Ces chiffres sont cohérents entre eux. La production électrique à partir du bois a augmenté de 7 TWh dans l'UE entre 2003 et 2004, soit une substitution annuelle de 1.75 Mtep, un chiffre « noyé » dans l'ensemble des usages « chaleur » du bois-énergie.

Pour la planète, nous avons chiffré le potentiel du « bois énergie » commercial à 1 550 Mtep pour 2020 (2 670 Mtep en y incluant les usages non commerciaux dans les PED et les « déchets » dans les pays industrialisés), en tablant sur une exploitation forestière « durable ». L'exercice « amélioré » de l'AIE va jusqu'à 1 648 Mtep pour 2030, (y compris le recyclage des déchets). Il n'y a pas de désaccord fondamental. Le montant du WEO est probablement sous estimé en tant que ressource accessible.

Cela étant dit, les usages actuels sont déjà très importants (1 100 Mtep en 2002) l'accroissement de la substituabilité annuelle est relatif. On pourrait tabler sur un potentiel exploitable supplémentaire entre 600 Mtep et 1 200 MTEP en 20 ans ; adoptons la valeur médiane, un **PSA de 45 Mtep par an**.

Biocarburants

C'est la zone sensible de la problématique énergétique mondiale, puisque la « société » s'est forgé une économie délocalisée où les flux de produits et de matières ont pris une dimension totalement incontrôlable. Les délocalisations humaines ne peuvent que s'imposer dans cette mouvance. Est-ce à dire que la société devient également incontrôlable ? Les articles de Michel Labrousse et Bertrand Château dans ce numéro abordent l'issue possible d'une forme appropriée de « décentralisation énergétique » qui remet en cause les paradigmes sur lesquels nous sommes obligés actuellement de vivre.

La substitution d'un carburant issu de la biomasse à un carburant fossile est le « changement » qui imposerait le moins de changements dans nos habitudes de transport et de mobilité, sinon dans leur ampleur. Distribution, moteurs, sécurité resteraient les mêmes. Voitures à pile à combustible, avec reformeur embarqué ou hydrogène stocké à bord sont en effet des mutations industrielles peu crédibles pour l'horizon 2030, et encore...

Mais jusqu'où peut-on aller avec les carburants issus de la biomasse ?

Pour cette période, l'UE (Systèmes Solaires 167 juin 2005) a affiché des objectifs de 18 Mtep en 2010 pour les bio carburants (bio éthanolet/ou ETBE, biodiesel et/ou EMVH) alors que la tendance pointerait plutôt vers la moitié de cet objectif. Les obstacles sont nombreux, plus conjoncturels et administratifs que techniques, semble-t-il.

La production annuelle actuelle de la filière éthanol a été de 0.32 Mtep en 2004. (le Brésil a produit 7.8 Mtep d'éthanol en 2004 soit 40 % de sa consommation pour les transports, avec des véhicules Flex Fuel acceptant tous les mélanges jusqu'à 85 % d'éthanol – la Suède en importe d'ailleurs). Pour le biodiesel, la production en 2004 a été de 1.7 Mtep dans l'UE mais les capacités de traitement sont bien plus importantes. Pour le biogaz, l'objectif européen est de 15 Mtep de biogaz en 2010 avec une production de 4.2 Mtep en 2004,

Les objectifs affichés pour l'Europe sont fort loin des besoins du transport (340 Mtep en 2002) qui représentent, à eux seuls, la moitié de la demande de pétrole de l'UE.

Les capacités de « substitution » des filières biocarburants sont donc assez limitées d'ici 2030. Un chiffre de 20 % a été avancé (« Clefs du CEA : Hydrogène et nouvelles technologies de l'énergie N° 50/51 Hiver 2005 »), sous la réserve de transformer par pyrolyse (pour la France) la majeure partie de la biomasse disponible, en particulier en ne la brûlant pas pour chauffer les processus, mais en faisant appel à des sources de « chaleur résiduelle » à température appropriée...

On pourrait extrapoler à l'Europe, puis au monde, de telles capacités de substitution pour le futur (20 %), mais nous ne disposons pas d'une telle flexibilité dans la période 2010-2030 et nous proposons de conserver les valeurs « objectif 2010 » de l'UE comme ordre de grandeur des valeurs de substitution supplémentaires pour la période 2010-2030, soit **30 Mtep**, mais c'est probablement fortement surestimé. Au niveau mondial, hormis États-Unis et Brésil, les capacités de substitution ne sont pas encore développées. Sauf à reconsidérer complètement la dynamique de cette filière sous la poussée des cours du pétrole brut, ce serait donc un **PSA de 50 Mtep** sur lequel nous pourrions tabler, sur la période, pour contribuer à la réduction des émissions de GES.

Il reste cependant à affiner ces estimations, car avec ces chiffres, on ne saurait pallier les conséquences de la « déplétion » pétrolière dans le secteur du transport. On verra, in fine, que la notion de « biomasse disponible » demande à être revisitée si l'on porte attention à la question cruciale du « vecteur énergétique pratique » du futur. La lecture des différentes publications en France n'est pas pleinement convaincante, car les exemples réellement chiffrés se cantonnent en général à une seule « filière » tout en reconnaissant « que l'on pourrait valoriser par ailleurs les résidus : pailles, sciures, au lieu de se contenter de les brûler ». D'autres se basent sur la « productibilité carbone » des terres agricoles non utilisées pour l'alimentation et estiment que la productivité de 1 Tep/ha pour les « huiles » ou 2 Tep/ha pour les alcools pourraient être multipliée par 5 ou 6 en considérant l'utilisation de la totalité de la biomasse photo synthétisée – le bio carbone retrouvant alors sa fonction primaire de « vecteur énergétique » – avec un apport externe d'hydrogène (?) et de chaleur non issue de sources « émissives ». Ceci changerait évidemment la donne de manière drastique, mais, jusqu'à preuve du contraire, est peu susceptible d'intervenir dans la période 2010-2030.

Bilan et voies de réflexion

Les « potentiels de substitution annuelle », les PSA, sont résumés dans le tableau ci contre : on disposerait donc approximativement de 130 à 150 Mtep de capacité de substitution annuelle, selon la dynamique industrielle, notamment, de l'éolien et du photovoltaïque que nous avons examinés brièvement plus haut.

Le potentiel majeur, encore une fois en dehors de l'efficacité énergétique – dont l'habitat solaire passif - réside dans les usages de la biomasse.

Tableau 3 - PSA

Substituabilité Annuelle	Mtep
Grande Hydraulique	14
Petite Hydraulique	1
Bois et Déchets	45
Bio fuels	50
Eolien	20
Geothermie	1.3
Geoélectricité	1
Solaire TH	8 à 10
Solaire PV	1.5 à 19 ?
Vagues et Marées	p.m
Total Annuel Arrondi	130 à 150

Si on les rapproche le Tableau 3 du Tableau 2, montrant l'influence du taux de substitution TRN sur l'évolution des émissions de GES, il apparaît qu'en mobilisant simultanément la totalité des possibilités des énergies renouvelables accessibles d'ici 2030, il serait peut-être possible d'approcher les conditions de stabilisation des émissions de GES, si un apport équivalent était réalisé à partir des filières classiques « décarbonées » ou non émissives. On ne parviendrait cependant pas à réduire les émissions en direction des objectifs du GIEC.

La filière éolienne (et plus tard photovoltaïque) joue un rôle important dans le secteur électrique, mais seulement dans celui-ci. S'il y a abondance et des réseaux suffisamment robustes pour délocaliser le bénéfice du foisonnement des parcs productifs, on pourrait même penser à soutenir le chauffage domestique et tertiaire par pompes à chaleur sur géothermie de surface, libérant ainsi progressivement de la biomasse ligno cellulosique pour des usages plus noble : les carburants de substitution.

Le défi de la biomasse

On est en effet amené à s'interroger sur les utilisations de la biomasse. Si, quantitativement c'est la ressource renouvelable majeure, est-il bien raisonnable de la brûler pour se chauffer, ou produire de l'électricité avec un rendement fort modeste de l'ordre de 20 % ? N'y a-t-il pas mieux à faire ? La photosynthèse est le mode de fixation du carbone atmosphérique qui a contribué à la création des gisements de combustibles « terrestres » fossiles que nous connaissons ; les phytoplanctons lacustres et algues marines ayant été plutôt les sources des hydrocarbures. Selon le fort intéressant article de Jeffrey Dukes – University of Utah (Burning Buried Sunshine in Climatic Change N° 61 – 2003), nous consommons de ces « stocks » 400 fois plus vite qu'ils ne se reconstituent. Nous le savons, mais ces deux modes le font avec des rendements fort modestes.

Par contre la transformation du carbone photosynthétique en « carburant de substitution » par les processus agricoles ou/et industriels couplés peut se faire avec un rendement de loin meilleur que celui des processus géologiques.

Selon les auteurs cités par J. Dukes, la photosynthèse fixe « au-dessus du sol » 31 Gt de carbone par an sur la planète (et 25 GT « au-dessous du sol » : racines, bactéries, champignons, etc.). L'humanité en utilise une part importante pour ses besoins vitaux – avec des rejets d'ailleurs recyclables. Il semblerait donc que l'apport annuel de carbone « renouvelable » soit largement du même ordre de grandeur que celui des besoins de « vecteur énergétique » que nous recherchons pour les usages mobiles.

La « compétition » pour le sol entre énergie et alimentation est probablement en partie spécieuse, car les usages biologiques (humains ou animaux) le rejettent... C'est donc principalement une question de recyclage. La Chine en a été un exemple millénaire, mais, de nos jours, les autobus urbains de la ville de GRAZ en Autriche, roulent à l'huile de friture recyclée des fast-food locaux.

N'y aurait-il donc pas lieu de porter une attention plus « intégrale » au cycle du carbone biologique, en tant que « vecteur » énergétique, tout de même plus commode sous forme d'hydrocarbure de synthèse, que l'hydrogène gazeux ou la batterie ? Est-il encore raisonnable de brûler la biomasse ?

Les autres sources « non émissives »

La substitution de ressources primaires « émissives » par des ressources « non émissives » n'est pas l'apanage des énergies renouvelables : séquestration du CO² des centrales classiques, centrales nucléaires, sont également des options ouvertes, mais les « apports » de ces sources pour enclencher un réel processus de décroissance des émissions de GES devraient être du même ordre de grandeur annuel que celui de la totalité des renouvelables, pour porter le taux de pénétration annuelle à TRN = 70 % au moins.

Sachant qu'une centrale nucléaire de 1 500 MW, ou une unité de même puissance sur combustibles fossiles avec séquestration à 100 % pourraient « substituer » **3 Mtep**, est-il envisageable de prendre l'option d'en réaliser **une par semaine** entre 2010 et 2030 pour approcher le taux de substitution indispensable ? ■