

Futuribles International

Produire et consommer à l'ère de la transition écologique

Note d'analyse 2 : La substitution de ressources rares par des ressources renouvelables (ou abondantes)

Jean-Loup Loyer, Pierre Papon

Cette note d'analyse est issue de l'étude de Futuribles International, « Produire et consommer à l'ère de la transition écologique », qui vise à analyser le potentiel de développement de modes de production et de consommation aujourd'hui émergents, et leurs impacts sur la consommation de ressources et les externalités. Après une première phase de diagnostic de la production et la consommation en France et dans le monde, un catalogue de 100 pratiques émergentes innovantes a été constitué. Il a permis d'identifier 10 familles d'innovations qui sont autant de leviers possibles de réduction de la consommation de ressources. La présente note constitue l'un de ces leviers. Dans la dernière phase de l'étude, des scénarios présentant des modes de production et de consommation durables à l'horizon 2030 ont été rédigés.
Présentation de l'étude et documents publiés : <http://www.futuribles.com/fr/groupes/produire-et-consommer-en-france-en-2030/>

I. Définition/champ couvert

Cette note d'analyse porte sur les innovations qui contribuent à remplacer des ressources rares par des ressources a priori abondantes. Il s'agit donc notamment de la substitution de ressources non renouvelables par des ressources renouvelables.

Le principal champ dans lequel ces substitutions sont développées est celui de l'énergie : remplacement des énergies fossiles par des ENR. La note proposera une synthèse sur les perspectives des ENR.

Le second champ d'application de cette note concerne le domaine des matériaux : fibres naturelles remplaçant les matériaux produits de manière synthétique (matières plastiques...) et matériaux composites synthétiques se substituant aux matériaux métalliques. La note va donc présenter les innovations récentes à haut potentiel dans le domaine.

II. Fondements / courant à l'origine de l'innovation

Pour ce qui est des matériaux, les industriels cherchent à substituer les matières synthétiques actuellement majoritairement utilisées par des matériaux plus respectueux de l'environnement. Les raisons de cette substitution sont d'ordres économique, stratégique et environnemental. Économique car certains métaux et matières plastiques produites à partir de combustibles fossiles sont de plus en plus coûteux à produire et à recycler. Stratégique car l'accès à ces ressources non renouvelables peut être particulièrement difficile et source d'une féroce compétition, ce qui peut poser à terme de véritables difficultés d'approvisionnement pour certaines entreprises. Environnemental car la pression des consommateurs et des autorités de réglementation incitent les entreprises à proposer des produits plus respectueux de l'environnement ; il en va ainsi de la substitution des matériaux métalliques par des matériaux organiques pour alléger les automobiles et ainsi réduire leur consommation de carburant.

III. Innovations principales et autres innovations repérées dans le domaine des matériaux

Innovation principale: L'Arboform, un nouveau biomatériau intervenant en substitution à la plupart des matières plastiques et certains métaux dans de nombreux objets de notre quotidien.

Autres innovations repérées: un nouveau procédé de production de fibres pour matériaux composites mises au point par Dow Chemicals permet de réaliser des fibres en polyoléfines, une famille de polymères, auparavant impossible par les procédés de production traditionnels. Or les polyoléfines remplacent les polyacrylonitriles actuellement majoritairement utilisés, permettant jusqu'à 50% d'émissions de CO₂ en moins tout en étant 20% moins coûteux. Le potentiel de cette fibre et du procédé de production associé est confirmé par le Bureau de la Fabrication Avancée du Département Américain de l'Énergie, qui a retenu en 2012 cette nouvelle technologie parmi les 13 projets de son « Initiative de Fabrication Innovante », qui vise à assurer la transition de technologies de production propres à haut potentiel commercial, de la recherche vers l'industrie. D'une manière générale, les matériaux composites – qu'ils soient d'origine naturelle ou produits synthétiquement – sont à l'origine de gains de masse par rapport aux matériaux traditionnellement utilisés (souvent métalliques), entraînant une réduction de la consommation d'énergies fossiles, en particulier dans les transports. Ainsi, bien que sortant légèrement du champ de la note, les principaux gains de consommation de matières premières énergétiques permis par les matériaux composites seront présentés.

IV. Arboform

1) Description de l'innovation

Le contexte général : des matériaux composites pour réduire la consommation de ressources naturelles non renouvelables

Les entreprises industrielles cherchent en permanence à améliorer la performance tout en réduisant le coût et l'impact environnemental des produits qu'elles réalisent. Les pouvoirs publics encouragent également le recours à des matériaux à l'impact environnemental réduit, à travers des initiatives de R&D ou des réglementations environnementales (encadrement des substances chimiques du type REACH, quotas de CO₂...).

Dans ce contexte, la substitution de certains matériaux usuellement utilisés dans les produits qui nous entourent par de nouveaux matériaux plus performants peut présenter un intérêt non négligeable. Les matériaux composites représentent dès lors la voie la plus prometteuse pour remplacer les matériaux métalliques utilisés dans de très nombreuses applications et produits. Un matériau composite est constitué de renforts – le plus généralement des fibres – disposés selon un arrangement géométrique particulier et dont la cohésion est assurée par une matrice. Il existe de très nombreux types de renforts (fibres de carbone, de verre, végétales, d'aramide...) et de matrices (organique, céramique, métallique) dont la combinaison varie selon les propriétés mécaniques que l'on souhaite obtenir. La grande majorité des matériaux composites actuellement utilisés sont constitués de fibres de carbone ou de verre plongées dans une matrice organique à base de résines polymères issues de la pétrochimie. Le bilan environnemental de tels « matériaux composites plastiques » n'est pas forcément positif par rapport aux matériaux métalliques qu'ils sont censés remplacer: en effet, leur production consomme forcément des combustibles fossiles non renouvelables alors que la phase d'utilisation aboutit généralement à une très forte diminution d'énergie consommée,

notamment dans les applications du secteur des transports. Au contraire, les composites à base de fibres naturelles – également dénommés « biomatériaux » dans le reste de cette note – sont produits à partir de la biomasse, une ressource naturelle renouvelable, et offrent donc un bilan environnemental généralement positif.

Le potentiel important des biomatériaux tels que l'Arboform

Parmi les différentes familles de matériaux composites, les biomatériaux représentent donc un levier important pour réduire la consommation de matières premières non renouvelables. Une grande partie des matières plastiques - produites majoritairement à partir de combustibles fossiles – sont susceptibles d'être remplacés par des biomatériaux, contrairement aux métaux. Nous concentrerons donc notre analyse sur la substitution des matières plastiques par les biomatériaux.

L'Arboform est un de ces exemples de biomatériaux: issu de recherches menées au sein du prestigieux Fraunhofer Institut allemand, il a été breveté puis mis au point en 1996 par la société allemande Tecnar GmbH. L'Arborform est une famille de matériaux thermoplastiques biodégradables constitués d'une matrice fabriquée à partir de sous-produits de la production de pâte à papier, à savoir la lignine et la cellulose, à laquelle des particules de bois, de lin ou de chanvre sont ajoutées en quantité variable selon les références produits¹. Ce biopolymère remplace avantageusement les polymères traditionnels dérivés de la pétrochimie : thermoplastique, il se prête parfaitement à la réalisation d'objets moulés de notre quotidien, ce qui lui vaut le surnom de « bois liquide ». En pratique, le client final achète l'Arboform sous forme de granulés, qui sont fondus avant d'être injectés dans un moule correspondant à la forme de la pièce à réaliser.

Cependant, l'Arboform n'est qu'un exemple parmi bien d'autres de matériaux innovants plus respectueux de l'environnement. Dans la catégorie des biomatériaux², on peut citer des fibres naturelles aux excellents rapports masse/résistance tirées du jute, du lin ou du chanvre, ainsi que des biorésines (alcool polyfurfurylique issu de la canne à sucre...). Du côté des matériaux composites plastiques, de nouveaux procédés de production permettent de réduire significativement l'impact environnemental de la production de fibres (plus de 50% de réduction d'émissions de CO₂).

2) Potentiel de diffusion de cette famille d'innovations d'ici 2030

Les matériaux composites plastiques

Le marché des matériaux composites plastiques connaît une forte croissance depuis plusieurs années, qui devrait se poursuivre, passant de 70 milliards de dollars en 2010 à 300 milliards en 2030³. Etant données les contraintes économiques (cf. paragraphe ci-dessous), ils resteront donc cantonnés aux applications de haute performance (sport, appareils médicaux) ou du transport (aéronautique puis surtout automobile). Ainsi, les matériaux composites plastiques pourraient représenter jusqu'à 40% de la masse des véhicules en 2030.

Les biomatériaux

¹ Carbonization of hot-pressed ARBOFORM®-mixtures, European Journal of Wood Production (2009) 67: 351–355, DOI : 10.1007/s00107-009-0347-8

² Pour plus de détails sur ces fibres naturelles, se reporter au site : <http://www.netcomposites.com/technology/materials-innovation/biocomposites>

³ [Lightweight, heavy impact](#). McKinsey Report, février 2012.

Les biomatériaux tels que l'Arboform s'appliquent potentiellement à la plupart des éléments non structuraux⁴ des produits qui nous entourent. De nombreux secteurs sont donc concernés⁵ : habillement (textiles fonctionnels), automobile (composants d'intérieurs, panneaux faisant office de portière, toit ou coffre), aéronautique (aménagement intérieurs, systèmes de services au passager), construction et ameublement (éléments de décoration intérieure, luminaires, meubles d'intérieur et d'extérieur), électroménager (structures extérieures et intérieures), électronique et télécommunications (coques d'appareils électriques et électroniques), médecine (implants, composants de dispositifs médicaux), industrie du jouet, articles de sport ou encore emballages. La chimie est la discipline transversale de base qui permet de produire le biomatériau en soi à partir de la matière organique végétale, généralement du bois.

Moteurs de la diffusion des matériaux composites et biomatériaux

Le moteur de la diffusion à court terme, tant des composites que des biomatériaux, est essentiellement d'ordre économique, s'ils s'avèrent moins chers à produire en masse que les matériaux habituels.

Or, les matériaux composites pâtissent encore d'un coût élevé par rapport aux matériaux usuels⁶ : 70 euros/kg contre 3 euros /kg pour des aciers simples, 6 euros /kg pour des aciers spéciaux and 7 euros /kg pour l'aluminium. Malgré les économies d'échelle inhérentes à l'augmentation des volumes de production, il est peu probable que les matériaux composites soient moins chers que les matériaux métalliques à l'horizon 2030. Certains experts estiment que leur prix actuel peut être divisé d'un facteur deux d'ici à 2030⁷.

Bien que l'équation économique soit actuellement difficile à établir étant donnée l'absence de données publiques, la hausse tendancielle des prix des combustibles fossiles est un facteur favorisant la substitution de matériaux traditionnels par les biomatériaux. A moyen terme, les impératifs environnementaux devraient inciter, voire contraindre, les industriels à adopter des biomatériaux afin de réduire leur consommation de ressources. D'une part, par la recherche d'une moindre consommation de combustibles fossiles et de métaux entrant dans la fabrication des produits. D'autre part, à travers la diminution des émissions de CO₂ générées lors de l'utilisation des produits, que permet l'emploi de biomatériaux plus légers, à l'instar de la consommation d'essence par les véhicules.

Freins à la diffusion des biomatériaux

Les freins à la diffusion des biomatériaux à court terme sont essentiellement culturels et tiennent à l'inertie technique typique de filières établies telles que l'automobile. La diffusion commencera donc par des secteurs de basse technologie sur lesquels la substitution aura un impact économique directement quantifiable, à savoir le secteur du jouet, les articles de sport,

⁴ On entend par éléments non structuraux les pièces qui n'ont pas vocation à absorber de grandes quantités d'énergie mécanique ou thermique lors du fonctionnement du produit ou lors d'un accident. En effet, les caractéristiques mécaniques des biomatériaux les disqualifient définitivement pour des pièces devant subir des contraintes importantes : châssis de voiture ou fuselage d'avions, majorité des pièces de moteurs dans les secteurs de l'énergie, de l'automobile ou de l'aéronautique, structures de bâtiments et ouvrages de génie civil, pièces électriques et électroniques, etc.

⁵ Pour une description plus détaillée par domaine, se reporter au site : <http://www.fibrenamics.com/en/index>

⁶ Composites Market Report 2012 - Market developments, trends, challenges and opportunities. B. Jahn, D. Karl, E. Witten.

⁷ [Lightweight, heavy impact](#). McKinsey Report, février 2012.

l'ameublement et les aménagements intérieurs simples d'automobiles et d'aéronefs. D'ailleurs, les principales applications de l'Arboform se trouvent d'ores et déjà dans ces domaines. A moyen terme, la lourdeur de la restructuration des filières industrielles lourdes viendra limiter l'essor des biomatériaux, puisqu'il faudra transformer les outils industriels de la pétrochimie afin de passer de la production actuelle de matières plastiques à des nouvelles méthodes de production de biomatériaux. A cet égard, les pays émergents pourraient adopter ces matériaux de substitution plus rapidement: leur industrie chimique reste en partie à développer et il est plus simple de mettre en place de nouvelles méthodes de production par l'intermédiaire d'usines « *greenfield* » que de réorienter les moyens de production existants.

En tout état de cause, le potentiel de l'Arboform a été confirmé par le Prix de l'Inventeur Européen de 2010, décerné par le prestigieux Office Européen des Brevets. Sa production a augmenté régulièrement depuis le lancement du produit, de 300 tonnes en 2002 à 5000 tonnes en 2013, soit un taux de croissance annuel moyen de 30%. En prolongeant cette tendance selon trois scénarios, la production d'Arboform devrait varier entre 150000 et 700000 tonnes par an en 2030 (Figure 1).

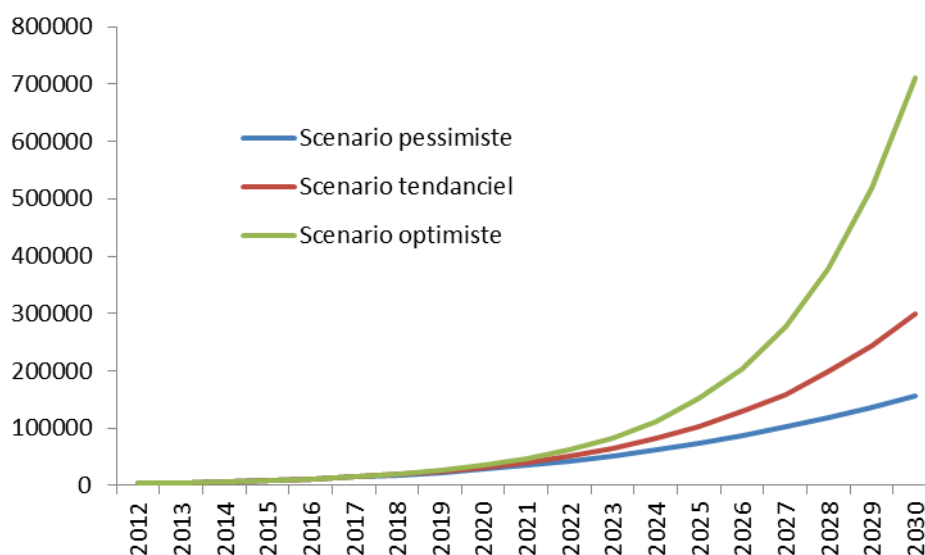


Figure 1 - Projections de production de l'Arboform à l'horizon 2030

A l'horizon 2030, on peut penser que la diffusion sera importante – sans toutefois être majoritaire - dans les industries du jouet, des articles de sport, de la médecine et de l'ameublement, tandis que la diffusion dans les industries de transport, électriques et électroniques devrait être bien plus faible, probablement limitée aux parties plastiques qui forment souvent moins de 20% de la masse des produits issus de ces industries. *In fine*, le potentiel de développement des biomatériaux est considérable car leur production actuelle représente moins de 1% de la production de matières plastiques⁸.

⁸ Current progress on bio-based polymers and their future trends, Progress in Biomaterials 2013, 2:8
doi:10.1186/2194-0517-2-8

3) Impacts sur les ressources

Les matériaux composites plastiques

Ces matériaux étant issus de la pétrochimie, leur production ne permet pas de réduire la consommation de matières premières non renouvelables ; tout au plus les combustibles fossiles se substituent-ils aux minerais métalliques. Par contre, les matériaux composites plastiques étant plus légers (30% de la masse de l'acier et 70% de la masse d'aluminium), ils permettent de réduire la consommation de carburant dans les applications de transport (aéronautique, automobile) de manière non négligeable (exemple de -20% pour des avions incorporant 50% de composites).

Les biomatériaux

L'Arboform, comme de nombreuses autres fibres naturelles, est plus écologique que les matières plastiques et métalliques car sa production consomme moins d'énergie, de solvants et de catalyseurs. Il comporte également moins de produits chimiques tels que les colles et il est recyclable aisément puisque il est 100% renouvelable et biodégradable.

Les biomatériaux étant généralement obtenus à partir de matière organique végétale, leur production a un impact inévitable sur la consommation de ressources renouvelables telles que la biomasse. En particulier, l'Arboform étant un sous-produit de la transformation du bois, son essor s'accompagnera à proportion d'une pression sur l'exploitation forestière. Ainsi, si l'on extrapole l'évolution de la production constatée au cours des 10 dernières années, la production d'Arboform devrait varier entre 150000 et 700000 tonnes par an, ce qui correspond à l'exploitation supplémentaire de 300000 et 1500000 tonnes de biomasse, sous l'hypothèse conservatrice de 2 kilogrammes de biomasse consommée pour chaque kilogramme d'Arboform produit. Le bois ayant une densité moyenne de 0.5, cela correspond à une production de bois supplémentaire comprise entre 150000 et 700000 de mètres-cubes, soit entre 1,5% et 7% de la production annuelle française de bois⁹, représentant des volumes largement gérables par les « filières bois ». Par ailleurs, si l'on considère que le seul Arboform représentera en 2030 autour de 10% de la production mondiale de l'ensemble des biomatériaux, l'impact total de la production mondiale de biomatériaux sur la biomasse se chiffre à moins de la production annuelle du seul bois pour la seule France. Un objectif largement à la portée des filières actuelles de production de biomasse au niveau mondial.

Quant à l'impact des biomatériaux sur la consommation de ressources naturelles non renouvelables, il se présente sous deux aspects principaux :

- La réduction de consommation de ressources durant la phase de production, qui touche tous les secteurs utilisateurs de l'Arboform. En termes de poids, un kilogramme d'Arboform correspond approximativement à deux kilogrammes de matières plastiques auxquelles il se substitue. Etant donné qu'il faut en moyenne deux kilogrammes de pétrole par kilogramme de plastique produit, l'utilisation de l'Arboform permettrait d'économiser entre 600000 et 2800000 tonnes de pétrole brut, soit entre 5 et 23 millions de barils de brut par an, ce qui représente entre 0,014% et 0,06% de la consommation annuelle. Ainsi, dans leur ensemble, l'essor des biomatériaux n'aboutirait, dans le meilleur des cas, qu'à une réduction de quelques

⁹ Chiffres-clés, Office National des Forêts,
http://www.onf.fr/filiere_bois/sommaire/informations/chiffres_cles/@@index.html

pourcents de la consommation annuelle de combustibles fossiles. Les minéraux et métaux sont encore moins concernés par la substitution par les biomatériaux.

- La réduction de la consommation d'énergie lors de l'utilisation du produit contenant de l'Arboform. Dans ce cas, le secteur du transport est particulièrement concerné puisque certains experts chiffrent à 0,4% la réduction moyenne de carburant correspondant à 1% de réduction de masse du véhicule¹⁰. A titre d'exemple, la substitution totale du volume de matières plastiques par des biomatériaux tels que l'Arboform pourrait réduire la masse totale d'une automobile entre 5 et 10%, soit une réduction de la consommation de combustibles fossiles par une automobile comprise entre 2 et 4%.

4) **Impacts sur les externalités**

Les biomatériaux tels que l'Arboform étant généralement issus de la biomasse, une exploitation irraisonnée de celle-ci, en particulier par une augmentation de la déforestation, pourrait avoir des impacts importants en termes de biodiversité, surface et qualité des sols. Toutefois, comme nous l'avons vu dans la section §IV.3, cette hypothèse est peu probable car les volumes concernés semblent largement compatibles avec les filières existantes d'exploitation de la biomasse.

Étant donnée la réduction de la consommation de combustibles fossiles inhérente à la substitution par des biomatériaux, la qualité de l'air (particules, monoxyde de carbone) et du climat (réductions des émissions de CO₂ et d'oxydes d'azote) seraient améliorées proportionnellement à leur essor. La qualité de l'eau pourrait également être améliorée par l'absence de l'étape de craquage, très consommatrice en eau, lors de la production des matières plastiques ainsi que par la moindre consommation de produits chimiques secondaires intervenant lors de la production de l'Arboform. Le chiffrage de ces gains à un niveau agrégé reste toutefois difficile car dépendant fortement selon chaque application : seul un bilan environnemental détaillé par produit ou application est à même de les quantifier de manière fiable.

5) **Quels effets rebond ou contre-productifs (sur la consommation de ressources naturelles non renouvelables) peut-on envisager en cas de diffusion massive de l'innovation ?**

Matériaux composites plastiques

Les matériaux composites plastiques étant issus de la pétrochimie, leur production consomme des ressources naturelles non renouvelables. Cependant, même selon les projections les plus optimistes (demande de matériaux composites plastiques de 500 000 tonnes par an à l'horizon 2030), cette production correspondrait à quelques millions de barils de pétrole brut par an, soit un volume dérisoire au regard des 30 milliards de barils consommés dans le monde pour l'année 2013.

¹⁰ Reducing Petroleum Consumption from Transportation, Christopher R. Knittel, MIT Center for Energy and Environmental Policy Research (2012), http://web.mit.edu/ceepr/www/publications/reprints/Reprint_238_WC.pdf

Biomatériaux

Les biomatériaux sont des substituts presque parfaits de nombreuses matières plastiques issues de la transformation des ressources naturelles non renouvelables. Bien que des impacts négatifs sur les ressources naturelles renouvelables (exploitation forestière et filière bois) restent possibles, des effets rebond ou contre-productif sur la consommation de ressources naturelles renouvelables semblent inexistantes en l'état actuel des connaissances.

Conclusion

Les matériaux composites, qu'ils soient d'origine naturelle ou produits synthétiquement à partir de ressources fossiles, contribuent à réduire la consommation de ressources naturelles non renouvelables. En ce qui concerne les biomatériaux, les gains sont doubles et portent à la fois sur 1) la réduction de la consommation de ressources non renouvelables durant la phase de production, 2) la réduction de la consommation de combustibles fossiles durant la phase d'utilisation due à l'allègement. A titre d'exemple, à l'horizon 2030, la diffusion d'un biomatériau tel que l'Arboform peut ainsi être estimée entre 150000 et 700000 tonnes produites par an, ce qui représenterait une économie tout à fait négligeable pour la phase de production (entre 0,014% et 0,06% de la consommation annuelle de combustibles fossiles) mais bien plus intéressante pour la phase d'utilisation (réduction de la consommation de combustibles fossiles comprise entre 2 et 4% pour une automobile). Quant aux matériaux composites plastiques, leur production présente généralement un bilan environnemental négatif par rapport aux matériaux métalliques usuels lors de la phase de production (production des fibres et matrice plastique à partir de combustibles fossiles, utilisation d'adjuvants et d'additifs chimiques...), compensé ensuite durant la phase d'utilisation par la diminution de la consommation de combustibles fossiles due à l'allègement.

D'un point de vue environnemental, les biomatériaux sont doublement intéressants. Or, la production des biomatériaux tels que l'Arboform ne représentait en 2013 qu'autour de 1% de celle de matières plastiques, auxquelles ils peuvent pourtant se substituer dans de très nombreuses applications. Ainsi, ils ouvrent des perspectives positives non négligeables dans un certain nombre de secteurs, en premier lieu les industries de l'habillement, de l'emballage, du jouet et de l'ameublement. Puisqu'ils se substituent à la majorité des matières plastiques et à certains métaux, leur impact sur la consommation de ressources non renouvelables semble globalement positif, même si le bilan environnemental reste à établir précisément produit par produit, secteur par secteur ; en tout état de cause, ce bilan devrait s'améliorer à l'avenir avec la rareté et les hausses associées des coûts des ressources non renouvelables.

Toutefois, les matériaux composites et les biomatériaux ne sont en aucun cas la panacée. Tout d'abord, l'esthétique « bois » des biomatériaux et « plastique » des matériaux composites plastiques n'est pas adaptée à tous les objets ou n'est pas forcément du goût des consommateurs. Ensuite, de par leurs caractéristiques physico-chimiques, ils ne pourront jamais remplacer la grande majorité des métaux dans les appareils électroniques. De même, leur faible résistance mécanique proscrit totalement leur utilisation dans la fabrication de nombreuses pièces structurales, qui représentent pourtant la majorité de la masse des produits pondéreux tels qu'automobiles, avions, bateaux, trains ou encore ouvrages de génie civil. Ainsi, dans une automobile, seuls les 20% de matières plastiques (intérieurs plastiques, textiles, gommages...) ou minérales (verre...) peuvent potentiellement être remplacés par des biomatériaux. La substitution des matières plastiques se heurte également aux inerties d'industries lourdes telles que la chimie ou techniquement conservatrice que sont l'aéronautique.

V. Synthèse sur les perspectives à horizon 2030 des ENR (énergies renouvelables)

1) Description

Les énergies renouvelables sont considérées dans la plupart des scénarios énergétiques comme un vecteur clé de la transition énergétique. En effet, elles doivent permettre de remplacer des énergies carbonées (mettant en œuvre des ressources fossiles) par des filières émettant peu de gaz à effet de serre et notamment de CO₂. Leur montée en puissance, si elle est indéniable, est encore lente mais il est possible d'envisager des progrès techniques qui changeraient la donne à l'horizon 2030.

2) État des lieux des ENR d'ici 2030

Les énergies renouvelables en France en 2012

Les produits pétroliers, l'électricité, le gaz naturel et la biomasse sont pour l'essentiel les vecteurs du mix énergétique final de la France (155 Mtep en 2012) alors que les énergies renouvelables assuraient 14,6% de la production totale brute d'électricité (11,2% pour l'hydraulique, 2,7% pour l'éolien et 0,7% pour le solaire photovoltaïque). La production par la filière éolienne n'a commencé à décoller qu'en 2010 et sa progression est constante depuis lors, quant à la part du solaire si elle est allée en croissant, elle reste encore faible ; la production électrique assurée par la biomasse (le bois notamment) est marginale.

Aux énergies renouvelables « électriques », il faut ajouter des énergies renouvelables thermiques, avec par ordre d'importance (sur un total de 15,7 Mtep en 2012) : le bois-énergie, les biocarburants, les pompes à chaleur, les déchets urbains, le biogaz, les résidus de l'agriculture, la géothermie, le solaire thermique (chauffes eau). Après un déclin lent de la production primaire totale d'énergies renouvelables, à partir de 1990, la conjoncture s'est retournée en 2006 avec une croissance moyenne annuelle de 5,3% sur la période 2005-2012 (elle a atteint 22,4 Mtep en 2012 soit 9% de l'énergie primaire).

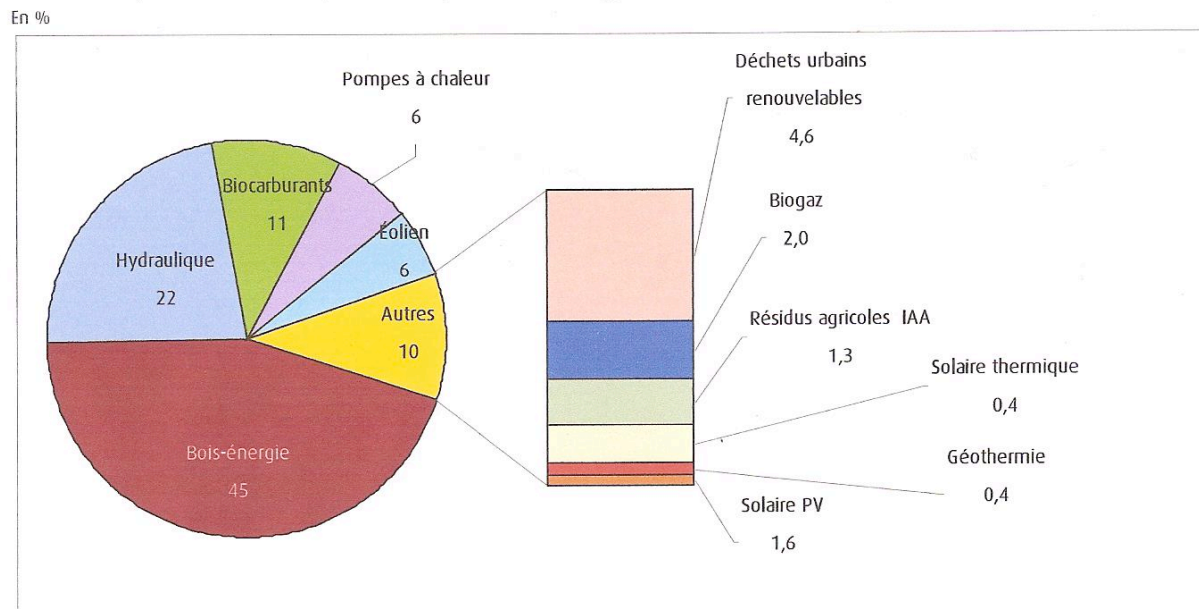
Dans son World Energy Outlook 2013, l'Agence Internationale de l'Energie, dresse un état des lieux de l'énergie mondiale et l'on constate ainsi qu'en 2011, les énergies renouvelables, toutes filières confondues, représentaient 13% de la demande d'énergie primaire. Le poids de la biomasse traditionnelle (bois, déchets végétaux) dans ce mix d'énergies renouvelables était relativement important (43%), tandis que 20% de l'électricité a été produite par des énergies renouvelables (à 80% par de l'hydraulique).

Une percée du solaire ?

Le solaire thermique (dit basse température) est la technique la plus simple d'utilisation de l'énergie solaire. Elle consiste à convertir le rayonnement solaire en chaleur pour son usage domestique (production d'eau chaude sanitaire, chauffage ou climatisation d'un bâtiment) à l'aide de capteurs. Ces capteurs sont en général installés sur le toit ou la terrasse d'une maison ou d'un immeuble, ce sont soit des panneaux vitrés, à l'intérieur desquels se trouvent des tubes en plastique où circule de l'eau, soit des capteurs où l'air circule entre une plaque absorbant le rayonnement et un plan isolant. La puissance thermique installée en France est relativement faible (1700 MWth en 2011, correspondant à une production de 80 ktep) car elle ne représente qu'une superficie de panneaux de 36 m² pour 1000 habitants. Le potentiel français est certainement sous-exploité puisque la moyenne européenne s'élevait, en 2011, à 64 m²/1000 habitants, alors que des pays moins bien ensoleillés que la France comme l'Allemagne (186 m²/1000 habitants), l'Autriche (567 m²/1000 habitants) et le Danemark (87 m²/1000 habitants) ont des performances très supérieures. L'AIE estime qu'une augmentation de 150% de la production mondiale d'énergie thermique solaire est possible

d'ici 2017 ; en France les potentialités de cette filière qui ne nécessite pas d'innovations sont importantes dans les départements méditerranéens. Le prix relativement peu élevé du gaz pour le chauffage a contribué à freiner son développement mais la perspective d'une hausse du prix de l'énergie et les nouvelles normes de consommation dans l'habitat peuvent changer la situation.

Part de chaque filière dans la production primaire d'énergie renouvelable en 2012 (22,4 Mtep)



On remarque le poids important du bois-énergie (45% du total soit 10 Mtep), le solaire photovoltaïque représente 350 ktep et l'éolien 1,3 Mtep. Source : Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques.

Deux techniques permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire : la filière photovoltaïque et la filière thermodynamique (ou à concentration). Aujourd'hui en France, seule la première est opérationnelle et elle met en œuvre l'effet photoélectrique à l'aide de cellules dites photovoltaïques. La seconde consiste à concentrer le rayonnement solaire direct à l'aide de miroirs (plans, paraboliques ou cylindro-paraboliques) soit au sommet d'une tour soit sur un tube (la chaleur captée va vaporiser un liquide alimentant une turbine couplée à un alternateur). La filière solaire est loin d'avoir résolu tous ses problèmes de « jeunesse » : - les coûts de fabrication des panneaux solaires (un assemblage de cellules avec des connexions électriques) demeurent élevés mais la quantité de silicium dans les cellules a été divisée par trois depuis 2000 et le prix des cellules a fortement baissé (il ne représente que 20% du coût total d'un panneau) - les rendements peinent à augmenter en dépit de réels progrès - les centrales solaires à concentration doivent faire leurs preuves. Les cellules au silicium sont les plus utilisées (sous forme soit de plaques de silicium mono ou poly-cristallin dont le rendement est compris entre 16 et 24% soit de couches minces déposées sur un support plan mais au rendement plus faible). On envisage des générations de cellules utilisant des semi-conducteurs autres que le silicium : le tellure de cadmium, l'arséniure de gallium, un alliage cuivre-indium-gallium-sélénium sont des options possibles (ces matériaux absorbent une autre partie du spectre solaire, on peut les utiliser sous forme de multi-couches). Une autre possibilité consiste à concentrer la lumière solaire sur les cellules à l'aide de petites lentilles ce qui augmente le rendement de la cellule (il pourrait atteindre 35%) tout en permettant aussi une meilleure dispersion de la chaleur évitant ainsi un trop fort échauffement local (une fraction importante de la lumière solaire, notamment le rayonnement infrarouge, est absorbée sous forme de chaleur par les cellules). La mise au point de cellules fabriquées avec des matériaux organiques semi-conducteurs ou dopés avec des colorants, offre des perspectives

intéressantes car leur coût de fabrication est faible mais elles ne seront rentables que si leur rendement est nettement augmenté (il ne doit pas dépasser 10%). Enfin, la chimie du solide propose une solution nouvelle avec un matériau organométallique semi-conducteur de la famille des pérovskites (en général ce sont des oxydes métalliques), composé d'un halogène (le chlore, l'iode ou le brome) et d'un métal comme le plomb ou l'étain préparé par déposition en phase vapeur sur un support. Le rendement de ces cellules est de 15% avec un voltage supérieur à celui du silicium. Cette filière qui est actuellement testée a l'avantage d'être facile à utiliser, éventuellement en tandem avec le silicium car elle n'absorbe pas les mêmes photons.

S'agissant de la filière thermodynamique qui exige des grandes installations (par exemple des tours avec un jeu de miroirs asservis au mouvement du soleil au cours de la journée), elle permet de stocker la chaleur solaire dans un matériau pendant la journée (par exemple un solide que l'on fait fondre) et de l'utiliser la nuit pour produire de l'électricité avec une turbine (un échangeur permet de transférer la chaleur à un liquide que l'on vaporise) couplée à un alternateur. Plusieurs centrales de ce type sont en cours d'essai ou en construction dans le monde (notamment dans le sud de l'Espagne, aux USA dans l'Arizona) ; une petite centrale (250 kW), en France l'installation Themis, à Targassonne près de Perpignan, construite par EDF dans les années 1980, est aujourd'hui réactivée comme site pilote, une autre (500 kW) fonctionne également depuis 2010 à la Seyne-sur-mer (Var). Cette filière n'est rentable que dans des régions à fort ensoleillement (l'Europe du Sud).

La filière solaire pour la production d'électricité ne se développera significativement en France à l'horizon 2030 (le Grenelle de l'environnement avait fixé l'objectif d'une puissance installée de 5,5 GW en 2020) que si le coût de production du kWh est considérablement abaissé (il est, aujourd'hui, au moins cinq fois plus élevé pour le photovoltaïque que celui du kWh réseau et l'écart est encore plus important pour la filière thermodynamique). Il est peu probable que la filière thermodynamique se développe en France sauf à envisager des petites installations équipées d'un moteur Stirling (un moteur à air chaud placé au foyer d'un miroir parabolique). Les perspectives sont plus ouvertes pour le solaire photovoltaïque dont le développement va dépendre : - de la possibilité d'augmenter les rendements des cellules – d'abaisser le coût en capital des infrastructures – du maintien pendant plusieurs années de subventions ou d'incitations fiscales aux particuliers et aux entreprises pour s'équiper en panneaux solaires et de tarifs de rachat du kWh avantageux - de la possibilité de mettre au point des installations de stockage de l'électricité. L'énergie solaire est intermittente (le facteur de charge d'une installation est d'environ 20% : elle ne débite en moyenne journalière que 20% de sa puissance maximum) et les installations devront être dotées de batteries de stockage (ou débiter sur le réseau). Le développement du solaire serait stimulé non seulement par des innovations techniques (nouvelles cellules), mais aussi par une ingénierie financière attractive facilitant les investissements notamment ceux des particuliers. Des solutions de leasing d'installations ou de location simple (le propriétaire d'un immeuble loue des panneaux à un prestataire de service et le rétribue en fonction de sa consommation de kWh) pourraient être adaptées, ces formules commencent à être pratiquées aux Etats-Unis. Pour que la production d'électricité photovoltaïque atteigne 1 Mtep (celle de l'éolien actuellement), il faudrait tripler la capacité raccordée au réseau aujourd'hui, c'est-à-dire une croissance à un rythme annuel équivalent à celui constaté depuis 2010 ce qui ne paraît pas hors d'atteinte. A plus long terme la filière devra être compétitive en l'absence de subventions : ce sera une épreuve de vérité.

A l'échelle mondiale, alors que la puissance installée en photovoltaïque était de 69 GW en 2011 (avec 52 GW en Europe, l'Allemagne représentant le tiers de la puissance mondiale, l'Italie produisant 7% de son électricité par le solaire, ce qui est un record mondial), l'AIE propose deux scénarios. Le premier volontariste (dit « 450 » qui permettrait de limiter à 2° C

l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère terrestre entre 1800 et 2100) fait l'hypothèse que 990 GW seraient installés en 2035, le second « Nouvelles politiques » (il conforte les politiques énergétiques récentes avec un net ralentissement de la demande) ne prévoit qu'un quadruplement de la puissance installée. Le solaire à concentration passerait de 2 GW en 2011, à 224 GW dans le scénario « 450 » et à 70 GW dans le second scénario. L'effort européen serait très important (la puissance installée passerait à 190 GW pour le photovoltaïque en 2035 dans le scénario « 450 » (avec sans doute un effort de l'Espagne dans le solaire à concentration où elle a une nette avance). La Chine enregistrerait une forte croissance de sa puissance installée car elle passerait de 3 GW en 2011 à 250 GW en 2035 dans le scénario le plus volontariste (mais elle rencontre aujourd'hui de très sérieux problèmes de connexion au réseau) alors qu'elle possède une très forte capacité de production de cellules (en 2012 elle assurait 60% de la production mondiale de cellules). Les Etats-Unis seraient également en forte croissance (129 GW pour le photovoltaïque en 2035 dans le scénario « 450 » et, cela vaut d'être noté, 64 GW pour le solaire à concentration). Le Japon qui est contraint de redéfinir sa politique énergétique après la catastrophe de Fukushima a une forte avance technologique dans le domaine du solaire (il est le premier déposant mondial de brevets) avec une forte base industrielle et il est très probable qu'il augmentera fortement sa puissance installée en photovoltaïque (5 GW en 2011 avec 7% de la puissance mondiale installée).

L'énergie solaire peut aussi être utilisée dans des « fours solaires » pour y faire des réactions chimiques à haute température. Une voie possible consisterait à transformer la vapeur d'eau et le gaz carbonique émis par des combustibles fossiles pour produire un « gaz de synthèse » (un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène). La chaleur solaire captée par des miroirs est dirigée dans un four sur un catalyseur (un oxyde de fer ou de manganèse, ou le cérium par exemple) qui va permettre la décomposition, en deux temps et à haute température (1000-1400°C), de la vapeur d'eau et du gaz carbonique. Dans une troisième étape, on peut produire des hydrocarbures à partir de nouvelles réactions à partir du gaz de synthèse (des réactions analogues à celles que l'on utilise dans la gazéification du charbon). Une autre voie, plus simple, consisterait à utiliser la filière thermodynamique dans un réacteur solaire dans lequel on chauffe de la biomasse, par exemple des déchets végétaux, en présence de vapeur d'eau, on peut produire un gaz de synthèse comme pour la gazéification du charbon qui est transformé en hydrocarbures par catalyse (réactions dites de Fischer-Tropsch).

La voie photochimique, utilisant l'électricité photovoltaïque pour décomposer la vapeur d'eau (ce que savent faire les plantes à l'aide d'une enzyme) est une autre possibilité, là encore il faut un bon catalyseur (le molybdène et l'étain sont une possibilité ainsi que des composés organiques). Une équipe suisse de l'EPFL à Lausanne a montré que l'on pouvait obtenir de très bons rendements avec des photo-électrodes constituées de nanoparticules d'oxyde fer.

Tous ces procédés de synthèse utilisant l'énergie solaire ont peu de chance d'être opérationnels, en France comme dans d'autres pays, avant 2030.

La filière éolienne terrestre compétitive

La filière éolienne a en quelque sorte une double dimension : terrestre et off-shore. L'éolien terrestre est une technique qui est quasiment mature même si des progrès sont encore attendus pour les turbines afin de réduire les coûts de production, de les adapter aux vents faibles (de vitesse de 3 à 6,5 m/s), et pour améliorer la prédictibilité de leur production. Les turbines standards à axe horizontal (fonctionnant avec des vents de vitesse de 6 à 12m/s) ont une puissance de 2 à 3 MW mais on sait construire aujourd'hui des turbines de 8 à 10 MW. Plus récemment on a commencé à développer des petites turbines à axe vertical (leur encombrement est moindre) de faible puissance (inférieure à 36 kW avec un mât de 10 à 35 mètres de haut), elles peuvent plus facilement s'insérer dans des zones urbanisées. En France,

la puissance éolienne installée était de 7,7 GW en 2013 (238 GW dans le monde en 2011 dont 94 GW en Europe - avec 29 GW en Allemagne et 22 GW en Espagne - et 63 GW en Chine).

La filière off-shore ou marine est de développement plus récent. Les turbines posées sur une plate-forme fixée sur le fond marin, doivent être adaptées à l'environnement marin où le vent souffle quasiment en permanence. Des problèmes techniques demeurent pour amener le courant électrique à la côte lorsque les éoliennes sont éloignées et les conditions de maintenance sont plus difficiles en raison de la corrosion. Pour l'heure aucune production n'est assurée en France par cette filière, mais six parcs d'éoliennes marines doivent être construits à la suite d'appels d'offres. Une solution envisagée est de construire des éoliennes flottantes, ancrées au fond... mais leur rentabilité économique devra aussi robuste que leurs ancrages.

La filière éolienne terrestre est proche de la compétitivité (un coût du kWh hors taxes à la sortie d'une centrale dans une fourchette de 6 à 11 c€ en moyenne européenne, le prix du marché HT du kWh en France est en moyenne de 4 à 5 c€). Le prix du kWh éolien off-shore est sensiblement plus élevé (le double) et l'expérience de la maintenance pour les parcs off-shore est relativement récente et limitée. On peut raisonnablement estimer que la filière éolienne terrestre poursuivra sa montée en puissance et sera compétitive en France avant 2030 (le facteur de charge est bien plus élevé que pour le solaire, il est de 20 à 35%) et son développement ne se heurte pas à de sérieux verrous techniques. Dans son scénario énergétique à 2030, l'ADEME fait l'hypothèse que la puissance installée pour l'éolien terrestre pourrait passer de 7,7 GW à 34 GW (proche de la puissance installée en Allemagne aujourd'hui). En revanche, le développement de la filière off-shore est plus aléatoire (un « gisement » de puissance de 12 GW selon l'ADEME avec un facteur de charge plus élevé que celui de l'éolien), car les problèmes que posera la maintenance devront être résolus dans de bonnes conditions économiques.

Au plan mondial, l'AIE fait deux hypothèses correspondant à chacun de ses scénarios : - un quintuplement de la puissance installée en 2035 (soit 1130 GW avec 7,5% de la production mondiale d'électricité) pour le scénario le moins volontariste – une multiplication par un facteur sept de cette puissance pour le scénario « 450 ». Selon l'AIE, l'éolien terrestre assurerait 80% des augmentations mondiale de capacité, l'UE contribuant davantage à l'éolien off-shore (notamment le Royaume-Uni) qui n'a pas encore véritablement fait ses preuves. Le Japon qui, jusqu'à présent avait peu investi dans l'éolien, notamment pour des raisons climatiques (les risques de typhons), est obligé de repenser sa stratégie énergétique et de prendre en considération la filière. Ainsi se lance-t-il dans un important programme éolien off-shore avec la construction d'un parc d'éoliennes flottantes au large de la centrale de Fukushima (140 éoliennes pour une puissance totale de 1 GW), un pari qui est risqué.

Enfin, ajoutons que le système de production électrique par des filières intermittentes (éolien et solaire photovoltaïque) suppose la mise en place de dispositifs de stockage de l'électricité (qui augmenteront le coût de l'investissement) tels que des batteries performantes.

La bioénergie : un gisement à exploiter

On peut regrouper dans cette rubrique des énergies renouvelables très diverses : les biocarburants, la biomasse végétale (le bois principalement), le biogaz produit par méthanisation des déchets, les algues. Les biocarburants sont les combustibles liquides (le bioéthanol et le biodiesel par exemple) destinés aux transports et produits à partir d'une matière première végétale. Les biocarburants dits de première génération (ou conventionnels) sont produits à partir de grains de blé ou de maïs, de plantes à sucre (betterave, canne) ou d'huiles végétales (colza, tournesol, palme, etc.). Ils ont été l'objet de critiques. La première concerne leur impact climatique : le bilan carbone des biocarburants (leurs émissions totales de gaz carbonique lorsqu'on prend en compte toute la chaîne de production depuis la mise en

culture jusqu'au stade industriel) comparé à ceux de l'essence ou du gazole est variable mais on admet que dans la majorité des cas il est meilleur que celui des carburants pétroliers si l'on n'a pas changé l'affectation de sols pour produire la biomasse (par déforestation par exemple). La seconde conteste l'utilisation de produits agricoles comme le maïs, destinés en priorité à l'alimentation, pour produire des biocarburants, alors que les besoins alimentaires de la planète vont augmenter. Il existe une alternative : fabriquer de l'éthanol, voire d'autres alcools et des hydrocarbures, à partir d'une biomasse non alimentaire (résidus agricoles et forestiers, tiges et feuilles, herbes), c'est la filière dite des biocarburants de « deuxième génération ». Cette biomasse ligno-cellulosique (par exemple des copeaux de bois) est en grande partie constituée par de la cellulose et de l'hémicellulose qui sont des sucres avec lesquels on peut pour produire des biocarburants comme l'éthanol, voire des hydrocarbures et par voie thermo-chimique ou biochimique (en utilisant des enzymes). Ces techniques sont encore coûteuses et nécessitent encore beaucoup de recherches (des usines prototypes sont en construction en France). Une troisième filière consisterait à utiliser des algues qui produisent des polymères tels que des lipides (des triglycérides et des acides gras) et des carbohydrates (des sucres stockés en partie dans l'enveloppe végétale). Les huiles produites par les algues, peuvent être utilisées directement ou indirectement comme carburants dans des moteurs. On peut cultiver des algues dans des bassins ou des bioréacteurs pour produire la matière première pour cette filière : les algues fixent le CO₂ de l'air et par photosynthèse en utilisant l'énergie solaire elles produisent la biomasse pour fabriquer des biocarburants.

Une autre voie, plus futuriste, offre des perspectives intéressantes pour la production de biocarburants : elle consisterait à utiliser la « boîte à outils » de la génétique et de la biologie synthétique (on réalise la synthèse complète d'un génome) afin de modifier partiellement ou totalement le génome de cellules de micro-organismes (bactéries, levures, micro-algues) afin qu'ils produisent avec un très bon rendement soit des enzymes pour dégrader la cellulose, soit un alcool comme l'iso-butanol, voire des hydrocarbures. Deux laboratoires sud-coréens sont ainsi parvenus récemment à modifier plusieurs gènes de la bactérie *Escherichia coli* qui produit directement des hydrocarbures simples. Le Japon et les Etats-Unis investissent beaucoup dans ces nouvelles filières de biocarburants, et en particulier pour le Japon dans ceux obtenus à partir de micro-algues.

La filière du biogaz offre, elle aussi, d'importantes perspectives bien qu'elle soit relativement peu développée en France contrairement à l'Allemagne. Elle a pour objectif de transformer en méthane des déchets agricoles ou urbains, des boues d'épuration urbaines et des effluents industriels et des déchets de l'industrie agroalimentaire. La méthanisation est réalisée dans des réacteurs à l'aide de bactéries anaérobies (à des températures de 30 à 60°C), le gaz produit peut être injecté dans des canalisations de gaz naturel ou brûlé dans une petite centrale thermique pour produire de l'électricité qui est débitée dans le réseau.

La biomasse solide est la filière d'énergie renouvelable la plus importante en France (45% de l'énergie primaire d'origine renouvelable), elle fournit une énergie (chaleur) par combustion essentiellement du bois (le « bois énergie ») et plus marginalement de déchets agricoles solides (paille notamment). Cette biomasse est utilisée par des particuliers (chauffage par des inserts en foyers fermés aujourd'hui très performants, chaudières à granulés ou plaquettes) ou par l'alimentation de petites centrales produisant de la chaleur et de l'électricité (cogénération).

La France pays agricole, dont le patrimoine forestier est important, a la capacité de développer la bioénergie plus qu'elle ne l'a fait jusqu'à présent. La biomasse solide est probablement le « gisement » le plus important, l'ADEME dans son scénario énergétique pour 2030 fait l'hypothèse que la production d'énergie par cette filière pourrait passer pour la production primaire de 10 Mtep à 18 Mtep. Mais pour cette filière comme pour celle du biogaz, la collecte de la ressource (bois, déchets solides et agricoles) est un point clé, elle doit être effectuée sur une base « régionale » (pour éviter des transports sur des longues distances)

en particulier pour alimenter des petites centrales mixtes chaleur-électricité. L'option de la méthanisation suppose l'installation de nombreux réacteurs dans les exploitations agricoles ou en sites urbains ce qui suppose des incitations fiscales et des tarifs de rachat des kWh incitatifs pour les mini-centrales. La France accuse un net retard sur les autres pays européens pour la production du biogaz : une production primaire de 410 ktep en 2011 contre 6,6 Mtep en Allemagne, 1,8 Mtep au Royaume-Uni et 0,5 Mtep en Italie. L'Allemagne est le leader mondial de la méthanisation (elle a déjà installé 7000 méthaniseurs agricoles et industriels contre seulement une cinquantaine en France). La Commission européenne a retenu dans son plan énergie à 2020 une croissance annuelle de 7% de la production de biogaz en Europe. Quant à la filière des biocarburants, dont le développement a été ralenti ces dernières années, elle offre encore des perspectives intéressantes (un objectif peu ambitieux de 3 Mtep en 2030 dans le scénario de l'ADEME au lieu de 2,4 Mtep en 2012) à condition de maîtriser les techniques de la seconde génération et que le cours du baril de pétrole demeure durablement au-dessus de 100 \$ afin que la filière soit rentable. Les autres filières (algues et production par le génie génétique) ne contribueront de façon substantielle à la production de biocarburants qu'au-delà de 2030.

Les scénarios de l'AIE pour la bioénergie sont relativement ambitieux : - un triplement de sa contribution à la production d'électricité (bois, végétaux) dans le scénario « nouvelles politiques » et un quintuplement dans le scénario volontariste « 450 » - une multiplication par un facteur 2,5 de la production de biocarburants (bioéthanol et biodiesel) en 2035 (3,3 millions de barils/jour) pour le premier scénario et une multiplication par un facteur 7 dans le second scénario. Deux pays joueront clairement un rôle de leader sur le marché des biocarburants : le Brésil dont la production de bioéthanol pourrait atteindre un million de barils /jour en 2035 et ses exportations pourraient représenter 40% du commerce mondial de biocarburants, et les États-Unis.

Géothermie et énergies marines : des « gisements » à valoriser mais avec des aléas

La géothermie exploite la chaleur emmagasinée dans le sous-sol terrestre à faible ou grande profondeur (dans le sous-sol la température s'accroît en moyenne de 3,3°C par 100 m). La géothermie superficielle (ou très basse énergie) se développe dans le secteur du bâtiment pour le chauffage, elle est facilement accessible, elle nécessite la mise en oeuvre de pompes à chaleur. La géothermie basse énergie (entre 30 et 90° C) nécessite des installations de pompage d'eau chaude dans des nappes situées entre 1500 et 2000 m de profondeur pour alimenter des réseaux de chaleur urbains par l'intermédiaire d'échangeurs (cette technique est utilisée dans le Bassin parisien). Enfin, une troisième filière, celle de la géothermie profonde (haute énergie au-delà de 90° C) permet d'utiliser de la chaleur pour produire par cogénération de l'électricité et de l'eau chaude pour des usages industriels ou domestiques (chauffage). Si la géothermie profonde offre peu de possibilités en France hormis dans des situations exceptionnelles (centrale de Bouillante en Guadeloupe), en revanche, les filières géothermiques à basse et très basse énergie peuvent être développées sans trop d'aléas techniques pour alimenter des réseaux de chaleur, le scénario de l'ADEME mise sur une puissance thermique installée de 3,5 Mtep en 2030 (0,5 Mtep en 2011).

Il existe quatre options pour exploiter l'énergie des mers. La première utilise l'énergie mécanique de la houle et des vagues, liée au déplacement de la surface de la mer. On peut récupérer une partie de cette énergie par différents dispositifs : flotteurs et radeaux oscillants éventuellement articulés, cloches à compression ou à dépression (l'air comprimé par une vague fait tourner les pales d'une turbine), des dispositifs utilisant ces principes pouvant également être construits à la côte. Une deuxième option consiste à capter l'énergie des courants marins à l'aide des « hydroliennes » sur le modèle des éoliennes dont les pales, à axe vertical ou horizontal, font tourner un générateur électrique (le flux du courant marin joue le

rôle du vent dans une éolienne). Les promoteurs de cette filière font valoir que par rapport aux éoliennes les installations sont de plus petite taille, à puissance équivalente, la densité de l'eau étant mille fois plus importante que celle de l'air, le flux qui met en mouvement un rotor est bien plus important avec une productivité régulière et continue dans le temps (non soumis aux aléas météorologiques). Une troisième possibilité met en œuvre l'énergie des marées, elle a fait ses preuves, en France, avec l'usine de la Rance (250 MW), le flux de la marée montante remplissant un réservoir de barrage ; ses perspectives demeurent limitées car les sites avec des grandes amplitudes de marée sont rares dans le monde. La quatrième option est « thermodynamique », elle utilise l'énergie thermique des mers et plus précisément le gradient de température existant entre la surface et le fond de l'océan pour actionner une machine thermique (une turbine). Une option plus futuriste, encore au stade de la recherche, consisterait à exploiter la différence de pression, appelée pression osmotique, qui existe entre deux milieux ayant une concentration en soluté différente, typiquement l'eau salée (riche en sel) et l'eau douce. On exploiterait la force mécanique exercée par la pression osmotique sur une paroi ou une membrane.

Sur le plan technologique, la mise en œuvre des filières d'énergie marine reste très aléatoire car elles nécessitent la construction d'infrastructures vulnérables (soumises au risque de tempêtes et à la corrosion) et des phases de développement passant par des démonstrateurs devront être conduites afin d'en apprécier le comportement en vraie grandeur et de s'assurer de la validité des hypothèses économiques permettant d'envisager leur déploiement à une échelle significative. Une hydrolienne flottante qui renferme un balancier tanguant avec les vagues, le projet *Searev*, doit être testée par un laboratoire nantais et plusieurs installations de ce type sont le d'ailleurs aussi au Royaume-Uni et au Portugal. En France, le Raz Blanchard, dans la Manche au large de Cherbourg, est une zone avec un fort courant marin qui peut se prêter à l'exploitation d'hydroliennes (un potentiel de 3 GW, la construction de 3 à 4 fermes pilotes avec 5 à 10 machines chacune est prévue). Des installations utilisant des hydroliennes ont un intérêt potentiel pour des îles ou sur des côtes isolées. Il est très peu probable que les énergies marines contribuent de façon significative à l'énergie primaire en France d'ici 2030 (dans le scénario de l'ADEME leur contribution est marginale : 0,3 Mtep sous forme électrique). Dans les scénarios de l'AIE, les énergies marines pour la production d'électricité représenteraient une puissance installée de 14 à 23 GW en 2035 (avec une production de 0,1 à 0,2% de l'électricité mondiale).

Ajoutons pour en terminer avec les perspectives d'exploitation de l'énergie mécanique de l'eau que s'agissant de l'hydroélectricité ses perspectives sont très probablement « stables » pour la France. En effet les fleuves et les rivières françaises sont tous équipés en barrages. La seule possibilité serait de développer la mini-hydraulique à l'aide de petites turbines performantes, il existe des possibilités sur certaines rivières mais le potentiel exploitable reste de toute façon limité ; il est vrai qu'EDF n'a pas favorisé cette solution, le tarif de rachat du kWh étant dissuasif. L'AIE, quant à elle, ne prévoit qu'une augmentation « modérée » de la production hydraulique mondiale (entre 70% et 100% de croissance pour la puissance installée selon les scénarios) avec, il est vrai, une très forte croissance en Afrique et au Brésil (respectivement un triplement et un doublement de la puissance).

3) Impacts sur les ressources d'une diffusion des énergies renouvelables

L'exploitation des énergies renouvelables aura inévitablement un impact sur les ressources renouvelables, c'est le cas en particulier de la bioénergie qui mobilisera une biomasse végétale, partiellement une matière première agricole à finalité alimentaire pour la production de biocarburants de première génération (maïs, betterave et colza notamment). La production de biocarburants en France (2,4 Mtep en éthanol et biodiesel, en 2012, avec 7% de

biocarburants incorporés à l'essence et au gazole importations comprises) mobilise aujourd'hui 1,2 million d'hectares (soit 4% de la surface agricole utile), toute augmentation de la production par cette filière mobilisera des terres agricoles utilisées ou en jachères (avec un impact sur les ressources en eau) qui impliquera un arbitrage sur l'utilisation des terres agricoles. L'utilisation des déchets agricoles et forestiers pour la production de biocarburants de deuxième génération et de biogaz n'aura, en revanche, aucune incidence sur l'utilisation des terres agricoles. Une augmentation importante de la consommation de « bois-énergie » nécessiterait une exploitation plus forte de la ressource forestière (un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel passant de 48% aujourd'hui à 75 % en 2030) avec probablement la plantation d'espèces d'arbres à pousse rapide (peupliers par exemple). La mise en oeuvre de la filière algue nécessiterait, quant à elle, l'utilisation de ressources en eau dont elle est fortement consommatrice : des bassins d'eau saumâtre pour les macro-algues ou de l'eau pompée pour les bioréacteurs de culture des micro-algues (espèces cultivées en eau de mer ou en eau douce) la première solution ayant l'avantage d'éviter des conflits d'usage potentiels avec l'agriculture.

Les filières d'énergies renouvelables solaires et éoliennes auront assez rapidement un impact sur la consommation de matériaux et principalement de métaux (la production du silicium ne pose pas de problème de ressource mais elle a une empreinte carbone non négligeable pour les panneaux importés) dont l'utilisation, pour plusieurs d'entre eux, est « critique » pour certaines filières. C'est le cas du tellure (un métalloïde sous-produit du raffinage du cuivre), et de terres rares comme l'indium (provenant de la métallurgie du zinc), le gallium provenant de l'alumine, utilisés dans des cellules photovoltaïques. Deux terres rares, le dysprosium et le néodyme sont utilisées pour fabriquer des aimants d'éoliennes. Ces métaux sont relativement peu répandus alors que la Chine a un quasi-monopole dans la production des terres rares. Un développement de ces filières supposera, avant 2030, une politique active de recyclage des matériaux (les techniques ne sont pas au point pour certaines terres rares comme le dysprosium).

Enfin, et c'est un problème en soi, le développement des filières de production d'électricité avec des énergies renouvelables nécessitera l'utilisation de stockage de l'électricité à l'aide de batteries ou de piles à combustible (ou du stockage dans des barrages). La mise au point de batteries à forte densité énergétique mobilisera, elle aussi, des matériaux (le sodium par exemple dans les batteries sodium-soufre) qui imposera tôt ou tard une politique de recyclage.

4) Impacts sur les externalités d'une diffusion des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables n'ont pas d'impact sur la biodiversité (sauf éventuellement si l'on cultivait des espèces végétales OGM pour fabriquer des biocarburants ce qui semble peu probable en France) ni sur le climat, sauf à envisager une transformation des sols sur une grande superficie pour la mise en culture de plantes utilisables comme biomasse pour la bioénergie (ce qui est peut-être le cas au Brésil avec une déforestation importante en Amazonie pour développer des cultures de canne à sucre et de soja, voire en Malaisie pour la production d'huile de palme), une situation, là encore, peu probable en France.

L'emprise au sol des éoliennes et des panneaux solaires n'est pas négligeable. Les éoliennes installées aujourd'hui ont une puissance de l'ordre de 2 MW, le diamètre de leur rotor est d'environ 80 m (avec un mât de 80 m de haut) mais les plus grandes éoliennes actuellement mises le marché ont une puissance de 5 MW avec un diamètre des pales de 130 m. Il est nécessaire de respecter une distance minimum d'espacement entre les turbines, comprise entre 300 m et 500 m, mais 95 % du terrain agricole sur lequel les éoliennes sont construites est utilisable. Il est clair qu'un parc d'éoliennes peut être la cause de nuisances sonores et d'ailleurs les normes européennes interdisent la construction d'éoliennes à moins de 500 m d'habitations. L'impact sur un paysage peut également être important. La production éolienne

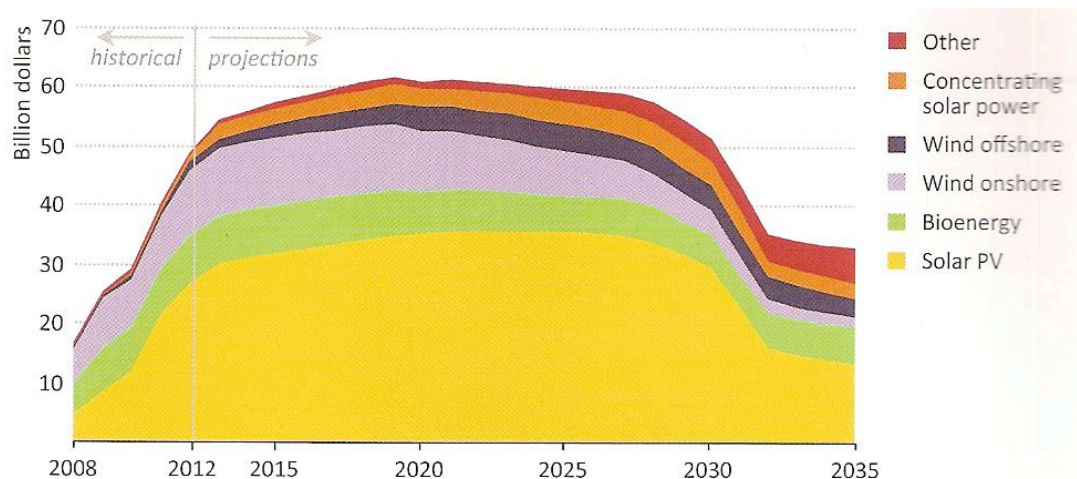
se joue également en mer à proximité du littoral, un milieu qui bénéficie de vents plus réguliers et en moyenne plus forts mais si elle ne pose pas de problème d'emprise, l'implantation des éoliennes doit éviter la gêne à la navigation et de perturber des zones de pêche. Enfin, les éoliennes terrestres et *offshore* peuvent constituer une gêne pour les radars (aéroportuaires et météorologiques), la parade consiste à mettre au point des pâles de rotor à faible signature radar.

Quant aux parcs de panneaux solaires, leur emprise au sol est strictement proportionnelle à leur surface (ceux construits sur des terrasses ou des toits n'ont aucun impact sur le sol mais ils peuvent avoir un impact esthétique). En revanche le terrain occupé ne se prête à aucune activité agricole, contrairement à celui occupé par les éoliennes (en France la plus grande part de la puissance photovoltaïque installée se trouve au sud d'une ligne Bordeaux-Nice dans des régions où, sauf exception, il y a peu de grandes cultures, on a une situation inverse pour l'éolien qui se trouve massivement implanté au nord d'une ligne La Rochelle-Genève).

L'avenir des énergies renouvelables : atouts et contraintes

Dans son *World Energy Outlook 2013*, l'Agence Internationale de l'Energie, « prévoit » pour son scénario le plus volontariste « 450 » que la part des énergies renouvelables dans la demande mondiale d'énergie primaire doublerait entre 2010 et 2035 (elle passerait de 13% à 26%). La production de biocarburants ferait un bond très important et pour la production d'électricité la part des énergies renouvelables y passerait de 18% à 48%, l'hydraulique gardant sa position de leader mais progresserait peu, avec en deuxième position l'éolien devant le solaire (la moitié de la production éolienne) et la bioénergie. Il est possible que les objectifs du scénario volontariste de l'AIE s'avèrent difficiles atteindre notamment pour ce qui concerne les filières solaires qui requièrent des sauts techniques. L'Union Européenne a fixé à 20% la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020 (avec une part de 34% de leur contribution à la production d'électricité). Cet objectif n'est pas hors d'atteinte et dans cette perspective, il sera instructif de suivre l'évolution l'Allemagne qui a déjà fortement développé les filières éolienne et solaire et a des plans très ambitieux : produire 80 % de son électricité par des filières renouvelables en 2050. Observons que celle-ci fait supporter aux consommateurs non-électrointensifs (particuliers et petites entreprises) par des taxes plus élevées une part importante du coût de son système énergétique, et en particulier de la priorité accordée aux énergies renouvelables. Si le programme de la future coalition gouvernementale, prévoit de maintenir le cap de la transition énergétique avec un objectif d'assurer 55% à 60% de la production d'électricité par des renouvelables en 2030, il est probable qu'elle diminuera ses objectifs pour l'éolien off-shore (15 GW en 2030 au lieu de 25 GW ?) et qu'elle sera amenée à réviser à la baisse les aides tarifaires à l'éolien et peut-être au solaire. Quant au Japon, à la suite de la catastrophe nucléaire de Fukushima, il est à la recherche d'une nouvelle stratégie énergétique dans laquelle il est probable que les énergies renouvelables seront en bonne place et il sera également instructif d'en suivre la mise en œuvre. De même sera-t-il utile de suivre la politique de développement des biocarburants du Brésil et des Etats-Unis.

Evolutions des subventions (aides directes, tarifs de rachat, incitations fiscales) aux énergies renouvelables dans les pays de l'UE (50 milliards de dollars en 2012)



On remarque la part très importante des deux filières solaires (en jaune et saumon). Après avoir plafonné à partir de 2020, elles baisseraient fortement après 2025.

Source : AIE, World Energy Outlook 2013.

La France qui avait une avance scientifique et technique importante dans le domaine de l'énergie solaire dans les années 1970-1980, s'est lancée avec retard dans le développement des énergies renouvelables, le solaire et l'éolien (elle a misé sur le nucléaire). Elle souffre, aujourd'hui, d'un handicap industriel pour la filière solaire qu'elle peut surmonter en innovant avec des nouvelles cellules (l'industrie allemande du solaire est aussi confrontée à de graves difficultés et les grandes entreprises du secteur ont quitté le marché) alors qu'elle a des atouts industriels pour promouvoir les technologies de réseaux électriques (réseaux dits « intelligents »). Elle dispose également d'un atout non négligeable pour la bioénergie du fait de sa forte tradition agricole qu'elle peut valoriser d'ici 2030 (notamment pour les biocarburants du futur). Tous les scénarios font l'hypothèse d'une forte croissance de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique de la France en 2030 : dans les trois scénarios proposés par l'ANCRE (Alliance Nationale pour la Coordination de la recherche sur l'Energie) elle serait de 20 % pour le mix primaire, pour l'ADEME elle représenterait 30% du mix final. Le développement des énergies renouvelables, en France et dans le monde, va dépendre de facteurs scientifico-techniques (notamment la mise au point de moyens de stockage et de nouveaux réseaux dits « intelligents »), industriels et fiscaux et plus généralement des politiques publiques à l'échelle nationale et régionale ainsi que de la capacité de l'Europe à les amplifier.

Observons pour terminer, qu'une production d'énergies renouvelables aura nécessairement une dimension « locale » car les systèmes de production devront s'intégrer dans des réseaux (par exemple la collecte de déchets végétaux et du bois-énergie) nécessitant des moyens de stockage et de distribution. Les politiques territoriales auront donc un rôle important à jouer pour les promouvoir.

5) Effets rebond ou contre-productifs (sur la consommation de ressources naturelles non renouvelables) en cas de diffusion massive des énergies renouvelables ?

En se faisant l'avocat du diable, peut-on envisager que si le développement des énergies renouvelables à l'échelle mondiale était important (on se trouverait par exemple dans le cadre du scénario le plus volontariste de l'AIE), celui-ci pourrait entraîner des « effets-rebonds » ? On peut en envisager au moins trois. Premièrement, on peut imaginer qu'un fort accroissement du prix du baril de pétrole sur une longue durée (ce que l'on ne saurait exclure) rendant très compétitifs les biocarburants, favoriserait l'augmentation de leur production à

l'aide de la biomasse agricole, entraînant ipso facto la mise en culture de terres agricoles en jachère (avec un risque d'émission de gaz à effet de serre) et mécaniquement une hausse de la consommation de gazole, d'engrais et de produits phytosanitaires (produits notamment à l'aide de gaz naturel). Le second résulterait de la conjonction d'une baisse de la part du nucléaire dans la production d'électricité (elle passerait à 50% en 2025 en France ?) et d'une forte augmentation de la production par les filières renouvelables, il faudrait alors pallier leur intermittence par le recours à des centrales thermique au gaz pour lisser les pointes de consommation, augmentant la consommation de gaz. Enfin, un troisième « rebond » possible résulterait de la forte croissance combinée de la production électrique d'origine éolienne et solaire et de la mobilité électrique avec une part importante des véhicules électriques dans le parc automobile. A l'échelle mondiale, ce phénomène se traduirait par une croissance très forte de l'utilisation de métaux « critiques » (terres rares pour les aimants, indium et gallium pour les cellules solaires, lithium pour les batteries, éventuellement le platine pour les piles à combustible). L'approvisionnement en certains de ces métaux (certaines terres rares comme le dysprosium et le néodyme utilisées dans les aimants et évidemment le platine) pourrait devenir problématique au-delà de 2030. Des politiques de recyclage, à peine ébauchées pour certains métaux, s'imposeraient lors. Observons aussi qu'un développement important des véhicules utilisant des piles à hydrogène (peu probable avant 2030) poserait inéluctablement le problème de sa production assurée aujourd'hui, sans difficultés, à partir du gaz naturel.

Sources :

- ADEME, *Contribution à l'élaboration des visions énergétiques 2030-2050*, Paris, novembre 2012, www.ademe.fr.
- ADEME, *La production éolienne d'électricité*, novembre 2013.
- ANCRE, *Scénarios énergétiques*, avril 2013.
- Commissariat général au développement durable, *Bilan énergétique de la France pour 2012*, Paris, juillet 2013.
- A. Euzen, L. Eymard, F. Gaill, *Le développement durable à découvert*, CNRS Editions, Paris, octobre 2013.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'énergie, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, CGDD, Paris, mars 2013.
- AIE, *Tracking clean energy progress*, Paris, avril 2013, www.iea.org.
- AIE, *World Energy Outlook 2013*, Paris, novembre, 2013.
- AIE, *Trends 2013 in Photovoltaics applications*, Paris, novembre 2013.
- JRC, PV status report 2013, septembre 2013, www.iet.jrc.ec.europa.eu/renewable-energies.
- G.Charmier et P. Destruel, *Les bioénergies au Japon : politiques publiques et R&D*, Ambassade France au Japon, service pour la science et la technologie, Tokyo, 2012.
- M. Payre, JF. Guillemoles, D. Lincot, « Une nouvelle génération de cellules photovoltaïques », *La Recherche*, No 472, p.52, février 2013.
- M.Liu et al. « Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapor deposition », *Nature*, vol. 501, p. 395, 19 September 2013, www.nature.com.
- C L. Muhich and al, « Efficient generation of H2 by splitting water with an isothermal cycle », *Science*, vol.341, p. 540, 2 August 2013, www.sciencemag.org.
- Y.J. Choi and S.Y. Lee, « Microbial production of short-chain alkanes », *Nature*, 502, p. 571, 24 October 2013.
- Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de l'aménagement du territoire, Centre d'études et de prospective, *Prospective agriculture énergie 2030*, Paris, 2010.
- JRC, *Critical metals in strategic energy technologies*, 2011, <http://setis.ec.europa.eu/newsroom/library/setisd-presentations/irc-report-on-critical-metals-in-strategic-energy-technologies>