
LA VALORISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

Sommaire

- 1. Généralités**
- 2. Les énergies renouvelables**
 - 2.1 - Les énergies géothermiques**
 - 2.2 - Les énergies gravitationnelles**
 - 2.3 - Les énergies solaires**
- 3. La valorisation des énergies renouvelables**
 - 3.1 - Valorisation de la chaleur**
 - 3.2 - Valorisation de la biomasse**
 - 3.3 - Valorisation des photons**
 - 3.4 - Valorisation de l'électricité**
 - 3.5 - Valorisation de l'hydrogène**
- 4. Conclusions**

1. Généralités

La valorisation des énergies renouvelables, c'est à dire leur transformation en une forme d'énergie propre, aisément utilisable, financièrement et socialement acceptable, devient un souci croissant de notre société. Les raisons en sont les critiques et/ou les faiblesses environnementales, économiques ou sociétales associées aux énergies traditionnelles qu'elles soient fossiles ou nucléaires

Pour le futur, les prévisions de consommation d'énergie dans le monde (8 920 MTep en 2011) sont en croissance régulière et certains prévisionnistes avancent une augmentation de 50% de cette consommation d'ici 2050. Une situation qui, fatalement et mécaniquement, conduit à un développement des trois sources d'énergie primaire à notre disposition: les fossiles, le nucléaire et les renouvelables:

- les fossiles connaissent certes un renouveau, le charbon pour des raisons économiques, les gaz de schistes et le pétrole par grands fonds, pour des raisons de nouveaux développements technologiques, mais, par définition, ils sont en quantité finie et leur épuisement -même s'il est actuellement retardé- est inéluctable à l'échelle d'un siècle ou deux, sans oublier leur impact sur la santé et l'environnement;

- le nucléaire est dans une situation partiellement comparable: la filière de la fission a aussi des ressources limitées, même si les spécialistes pensent pouvoir repousser l'échéance de leur épuisement de quelques siècles grâce à la filière surgénératrice. A cela il faut ajouter que la gestion des déchets est mal acceptée par une grande partie de la société. Par contre, la filière de la fusion contrôlée, qui devrait être validée dans la seconde moitié de ce siècle, pourrait être socialement mieux acceptée: elle génère moins de déchets qui sont moins nocifs et serait quasi renouvelable à l'échelle de millions d'années, grâce aux ressources immenses en deutérium disponibles dans l'eau de mer. En contrepartie, cette filière présente l'inconvénient d'une production nécessairement très centralisée.

Compte tenu de ces constats, les ressources renouvelables – des milliers de fois supérieures aux besoins mondiaux et par nature décentralisées- sont donc porteuses d'un avenir très prometteur, sous réserve que les développements attendus sachent résoudre l'inadéquation entre la fourniture intermittente et la demande, c'est à dire résoudre le problème de leur stockage, et que cette valorisation soit compatible avec une technologie économique et acceptable socialement.

2. Les énergies renouvelables

Ces énergies renouvelables diffèrent par leurs origines et peuvent être classées en trois domaines :

- les *énergies géothermiques* exploitant la chaleur contenue dans notre sous-sol,
- les *énergies gravitationnelles* dues à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil, et qui se manifestent par les marées (sa forme d'énergie potentielle) et certains courants marins (sa forme d'énergie cinétique appelée hydrolienne),
- les *énergies solaires* issues du rayonnement photonique, qu'elles soient directes (exploitation des photons), ou indirectes, c'est à dire issues du fonctionnement de la machine atmosphérique solaire (la biomasse, les vagues, l'hydraulique, la thermique, le photovoltaïque, l'éolien, ...).

Ces diverses formes ont chacune leur spécificité et, selon leur nature, le problème de leur stockage se pose ou pas et se résout – dans le premier cas - de manières différentes et adaptées. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes, les énergies solaires ayant une potentialité très supérieure à celles des deux autres formes d'énergies renouvelables.

2.1 - Les énergies géothermiques

Ces énergies, quelles que soient leurs sources, naturelles (sources d'eaux chaudes ou de vapeur, comme les sources de Larderello en Italie, Islande, Nouvelle Zélande, Indonésie ...) ou artificielles (forages) ont les caractéristiques suivantes :

- la puissance exploitable au niveau mondial serait de l'ordre de 50 GW, ce qui est faible en regard de la consommation mondiale d'énergie,
- la production (chaleur ou électricité) est contrôlable, réglable et disponible en continu : elle ne demande donc pas la mise en œuvre d'un stockage.

Remarque : on assimile fréquemment à la géothermie la source de chaleur qui permet d'alimenter une pompe à chaleur prélevant ses calories à faible profondeur dans le sol : en fait, il s'agit de chaleur stockée dans le sol grâce au rayonnement solaire et pas du tout de la chaleur provenant du centre de la Terre. Cette énergie est déjà stockée sur de longues périodes (des mois) et donc disponible sans contrainte particulière, hormis la nature du sol (il faut une bonne conductivité thermique).

2.2 - Les énergies gravitationnelles

Cette forme d'énergie était peu exploitée jusqu'à une période récente : elle était essentiellement portée par la centrale marémotrice de la Rance, en France, et par celle d'Annapolis Royal au Canada. Les caractéristiques principales de ce mode d'exploitation sont les suivantes :

- l'énergie dissipée dans le monde par cette forme d'énergie est de l'ordre de 20% de la consommation mondiale d'énergie mais le nombre de sites possibles est très limité car, pour être économiquement exploitables, il faut un marnage qui dépasse 10 mètres, ou une vitesse de courant supérieure à 3 nœuds.
- la disponibilité d'énergie est cyclée (rythme des marées) et prévisible donc plus aisée à gérer pour alimenter un réseau électrique.

Depuis quelques années une exploitation de cette forme d'énergie se développe via les courants sous-marins dus aux marées: elle est appelée hydrolienne. Il s'agit de grandes hélices posées sur les fonds marins et qui tournent très lentement (protection de la faune). Un exemple est le projet EDF de Paimpol-Bréhat, en Bretagne, qui est en cours de test (Fig.1). L'hélice a un diamètre de 16 m et elle

est posée par 35 m de fond. La puissance max. obtenue est de 0,5 MWe. On considère que le potentiel mondial de cette forme d'énergie est de l'ordre de 90 GW.

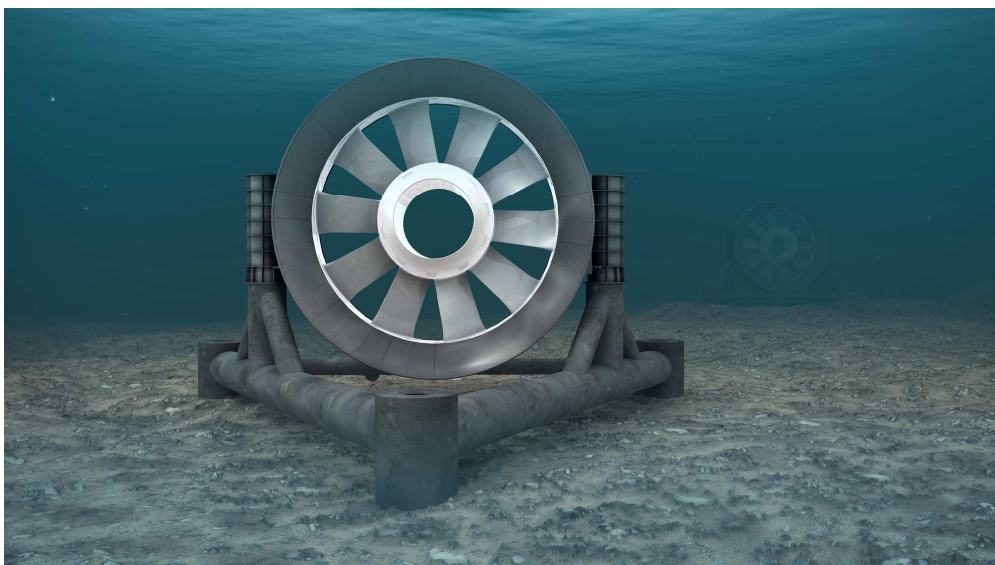


Figure 1 - L'hydrolienne de Paimpol-Bréhat

2.3 - Les énergies solaires

Ce sont celles qui posent le plus grand nombre de problèmes techniques et économiques mais ce sont aussi les plus intéressantes par leurs potentialités.

2.3.1 – La biomasse

La biomasse est l'ensemble des matières organiques issues de la photosynthèse ; elle est déjà une forme stockée de l'énergie solaire. Après transformation (vaporeformage, pyrolyse, méthanisation ...) elle peut se stocker sous une forme plus concentrée : biogaz (méthane), méthanol, éthanol, esters, hydrogène

En France, le potentiel de biomasse en 2011¹ était de 62,5 MTep équivalent, dont près de 50% sont les résidus de cultures annuelles et près de 30% représentent l'exploitation des forêts. A cela s'ajoutent les déchets organiques d'élevage et ceux des ordures ménagères.

Remarque: on peut noter que les combustibles fossiles ne sont que de la biomasse stockée depuis des dizaines de millions d'années et pourraient aussi bien être classés dans ce paragraphe!

2.3.2 – L'énergie des vagues

L'énergie des vagues (ou énergie houlomotrice) est une forme dégradée de l'énergie éolienne. Elle présente, par rapport à cette dernière, certains avantages :

- elle est plus répartie,
- elle est déjà une forme partiellement stockée de l'énergie éolienne dans la mesure où cette dernière est déjà stockée sous forme cinétique ; elle est donc plus prévisible (météo) et régulière et donc, à priori, plus facile à exploiter.
- son exploitation est plus discrète.

Elle a déjà atteint une phase de faisabilité dans plusieurs pays, en particulier en Grande-Bretagne et au Portugal, où plusieurs prototypes fonctionnent (Fig. 2). Compte tenu de la puissance spécifique des capteurs de houle, la puissance opérationnelle se situe dans la gamme de quelques centaines de kW (750 kW dans le cas du module *Pelamis*).

Le principe est le suivant: le mouvement des vagues agit dans chaque articulation sur un vérin hydraulique qui envoie du fluide haute pression vers une turbine produisant de l'électricité.

¹ L'Observatoire National des Ressources en Biomasse - Evaluation des ressources disponibles en France - Edition 2012



Figure 2 - Prototype de récupération de l'énergie des vagues (Le Pelamis, Edimbourg)

2.3.3 – L'énergie hydraulique

C'est l'énergie associée aux précipitations pluvieuses ou neigeuses. Elle est disponible sous deux formes : potentielle (barrage) et cinétique (le courant dans une rivière).

- la première est déjà sous une forme stockée, exploitable sans contrainte particulière ; elle ne demande aucun stockage en aval. Cette technologie représente la quasi-totalité de la production actuelle d'électricité d'origine hydraulique.

- la seconde, mise en œuvre par le biais de turbines fonctionnant au fil de l'eau, fournit de l'énergie électrique « fatale » qui doit être utilisée au fil de sa production.

En France, la production d'électricité d'origine hydraulique, à peu près constante depuis 1975, a été de 64 TWh en 2012², soit 11,8% de la production totale d'électricité.

2.3.4 – Le solaire thermique

Cette forme d'énergie est l'utilisation du rayonnement solaire pour produire des calories. Elle se met en œuvre par le biais de capteurs adaptés, plans ou à concentration.

- Cas des capteurs plans : dans ce cas, le capteur absorbe le rayonnement solaire, avec ou sans effet de serre ; ce rayonnement se transforme en calories dont le niveau de température dépend de la technologie mise en œuvre : de 2 à 3 dizaines de degrés pour les capteurs plans sans couverture (type capteurs de piscine) jusqu'à plus de 100 degrés pour les capteurs évolués avec vitrage et dépôt sélectif. Ces calories sont transférées à un liquide (souvent de l'eau) qui peut être stocké, la chaleur étant ainsi conservée quelques heures grâce à la haute chaleur spécifique de l'eau. Il s'agit, typiquement, de chauffe-eau solaires pour l'habitat.
- Cas des capteurs à concentration : dans ce cas, le rayonnement est d'abord concentré par un réflecteur soit directement, soit indirectement par le biais de miroirs plans réfléchissants (centrale à tour). Au foyer de ce concentrateur, les calories peuvent atteindre des températures variant de 250°C (concentrateur semi-parabolique) à quelques centaines de degrés (centrales à tour) selon le facteur de concentration. Ces calories sont transférées soit à un liquide (pour quelques centaines de degrés), soit à un gaz neutre (généralement de l'hélium) pour les températures plus élevées. Les installations mettant en œuvre ce type de capteurs produisent le plus généralement de l'électricité.

Le potentiel de cette filière thermique est considérable: il a été estimé à 3 millions TWh/an dans le monde³. A titre d'exemple, la plus grande centrale à concentration du monde, baptisée Shams-1, a été inaugurée à Abu Dhabi (Fig. 3) en mars 2013 et fournit une puissance max. de 100 MW.

² Mémento sur l'Energie - CEA - Edition 2013

³ Solar Paces Report - "Global Potential of Concentrating Solar Power", sept. 2009 - DLR (Allemagne)

Il faut aussi noter la mise en œuvre possible de miroirs sphériques: cas des *Dish Stirling* fonctionnant vers 700°C, de quelques dizaines de kW, déployés aux USA.



Figure 3 - La centrale solaire de Shams-1 (Abu Dhabi 2013)

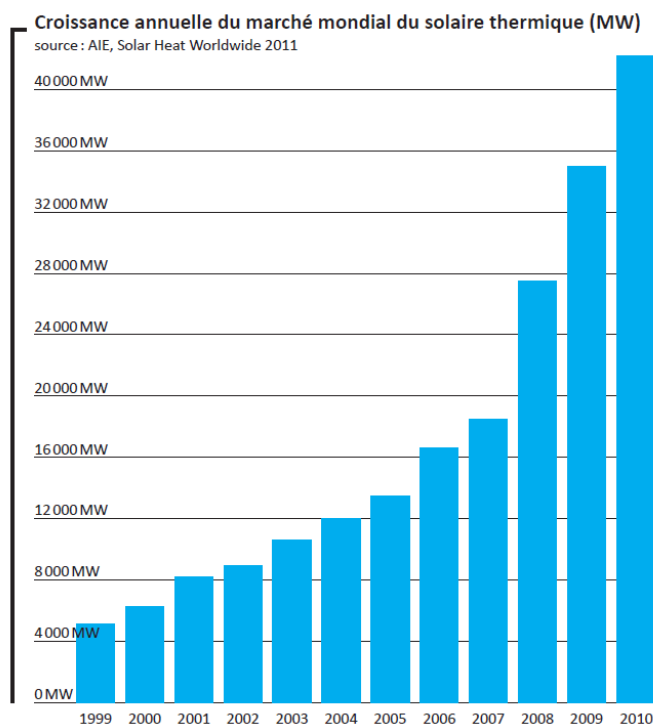


Figure 4 - Croissance du marché mondial du solaire thermique

Fin 2010, la puissance solaire thermique installée dans le monde était de 195,8 GW (dont près de 60% en Chine), soit une surface équivalente d'environ 279,7 millions de m². La France⁴ (7% du bilan

⁴ Syndicat des Energies Renouvelables - Edition juin 2012 - http://www.enr.fr/docs/2010144459_ST01DeveloppementMondemai2010.pdf

européen) avait, en 2012, une puissance installée de 182 MW. La figure 4 montre la forte croissance de la production solaire thermique ces dix dernières années.

2.3.5 – L'énergie solaire photonique

Les photons émis par le soleil et reçus sur terre peuvent être transformés en une autre forme d'énergie que la chaleur (cf. §5.4). Plusieurs procédés de conversion existent:

- le photovoltaïque
- la photoélectrochimie
- la biophotolyse de l'eau,
- la photo-fermentation

2.3.5.1 - Le photovoltaïque

Les photopiles (ou cellules solaires) transforment directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'interaction de photons et d'une jonction semi conductrice p-n (généralement de type silicium). Sa découverte remonte à 1941. Depuis les premières cellules fabriquées par *Bell Telephone Lab.* dont le rendement atteignait 6%, les photopiles atteignent aujourd'hui un rendement de 27% en laboratoire et près de 15% dans leurs versions industrielles. Leur prix a considérablement baissé ces cinq dernières années, en particulier grâce aux efforts des sociétés chinoises, pour atteindre des valeurs inférieures à 2€/Wc. C'est le mode de conversion solaire en électricité le plus développé dans le monde après l'énergie éolienne: 68 600 MWc installés⁵ dans l'UE fin 2012 (dont 4 030 en France), contre 105 600 MWc pour l'éolien (dont 7 500 en France).

2.3.5.2 - La photoélectrochimie

C'est le procédé, baptisé PEC, qui consiste à faire directement interagir les photons avec un matériau semi-conducteur immergé dans de l'eau, lesquels photons apportent l'énergie nécessaire à une réaction d'électrolyse avec production d'hydrogène et d'oxygène. C'est, en quelque sorte, une production d'électricité de nature voisine de celle de la production photovoltaïque (cf. §2.3.5.1) directement couplée à un électrolyseur d'eau (voir plus loin). Les rendements actuellement obtenus sont de l'ordre de 4 à 5%, inférieurs au produit des rendements (photopiles x électrolyseur) qui peuvent atteindre le double. A titre d'exemple, un dispositif PEC à cellules en « tandem » intègre une photo anode et une cellule solaire au dioxyde de titane : la partie du spectre non absorbé par la photo anode est transmise à la cellule photovoltaïque qui permet d'obtenir une différence de potentiel suffisante pour permettre la dissociation de la molécule d'eau (cf. Fig. 5). Ce procédé est encore au stade du laboratoire et a fait l'objet d'un contrat européen, NanoPEC⁶, qui s'est achevé fin 2012.

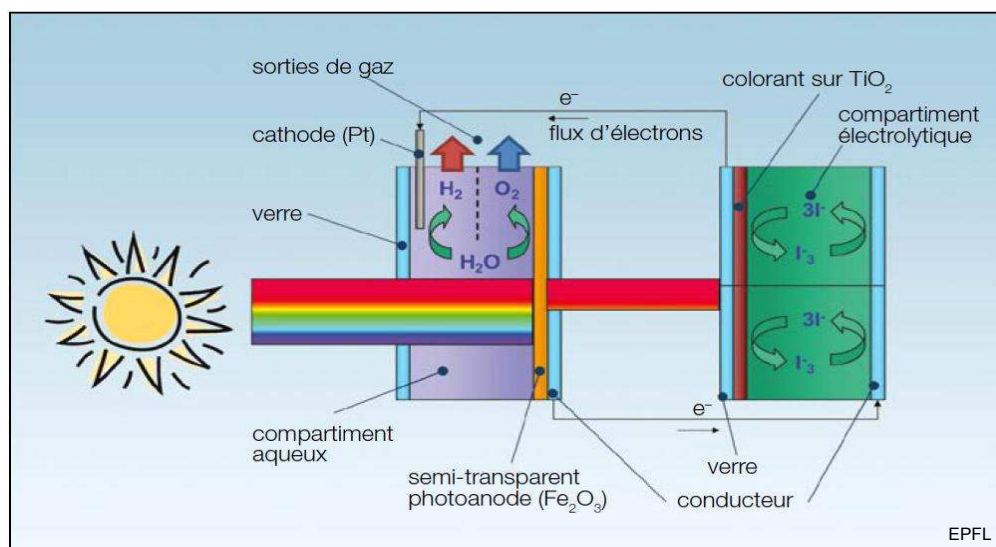


Figure 5 - Dispositif PEC à cellules en "tandem" développé par PEC House

⁵ Mémento sur l'énergie édition 2013 - CEA

⁶ <http://www.openaire.eu/it/component/openaire/publications/default/?format=raw&project=NANOPEC>

2.3.5.3 - la biophotolyse de l'eau

Cette voie est détaillée dans la fiche 3.3.2 sur ce site et conduit à la production d'hydrogène à partir d'algues ou de cyanobactéries; elle met en œuvre des réactions voisines des réactions naturelles de la photosynthèse. Ce procédé est encore au stade du laboratoire.

2.3.5.4 - la photo-fermentation

Il s'agit d'un procédé de fermentation par des bactéries photosynthétiques : à l'aide de rayonnement lumineux, les nitrogénases convertissent le glucose en hydrogène et dioxyde de carbone. Cette synthèse s'effectue uniquement sous carence d'azote. Cette voie permettrait la valorisation des déchets organiques. Des études ont montré que la bactérie *Rhodobacter sphaeroides* permet de produire de l'hydrogène en consommant 98 à 99 % d'acides organiques. Ce procédé est encore au stade du laboratoire.

2.3.6 – L'énergie éolienne

L'énergie cinétique du vent fut très longtemps convertie en énergie mécanique par les « moulins à vent » qui moulaient les céréales et asséchaient les terres des Pays Bas. Aujourd'hui, ces moulins sont devenus de grandes hélices à trois pales qui, dans leur mouvement, entraînent des génératrices électriques. La puissance unitaire de ces éoliennes varie de quelques kW à 8 MW pour la plus grosse (la machine V164 de Vestas testée début 2014). La réunion d'un ensemble d'éoliennes s'appelle une "ferme" ou un "parc". La mise en place de ces fermes se fait aussi bien sur terre qu'en mer (off-shore). La plus grosse ferme est en off-shore et sa puissance max. dépasse 200 MW (**Horns rev2**, en Mer du Nord - Fig. 6).

La puissance installée fin 2012 atteint 105 600 MW dans l'UE, comparés aux 241 000 MW installés dans le monde (voir Fig. 7) (dont 75 000 MW pour la Chine).



Figure 6 - La ferme éolienne off-shore **Horns rev2**, en Mer du Nord

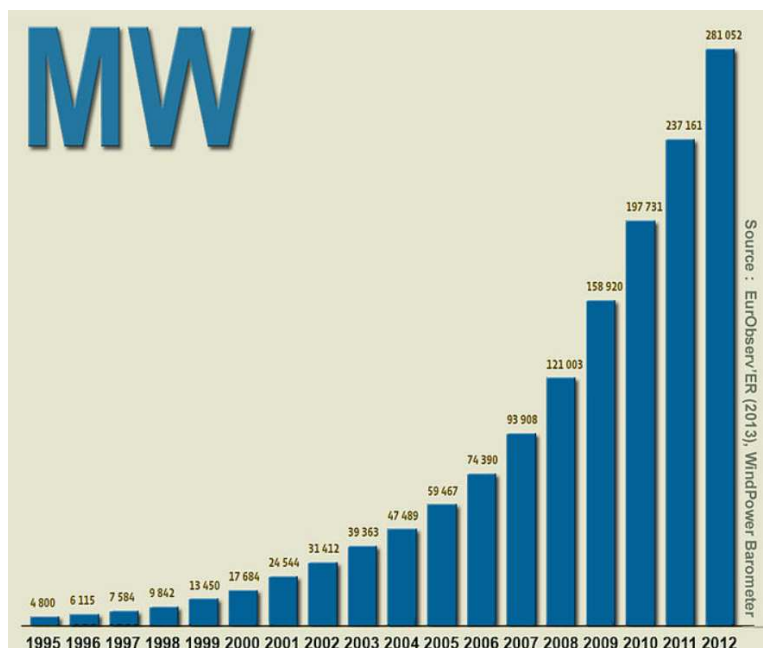


Figure 7 - Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde

3 - La valorisation des énergies renouvelables

3.1 - Valorisation de la chaleur

La chaleur "renouvelable" peut provenir de plusieurs sources selon son niveau thermique:

- la chaleur solaire stockée dans le sol ou les nappes phréatiques, récupérable au moyen de pompes à chaleur, dans la gamme 5 - 20°C,
- les capteurs solaires plans qui fournissent des calories dans la gamme 20 - 120°C, que ce soit sous forme liquide (eau glycolée) ou d'air chaud (murs Trombe, puits canadien ...)
- les capteurs solaires à semi-concentration, dans la gamme 200 - 300°C,
- les centrales à tour, dans la gamme 500 - 800°C.

Les deux premières sources sont valorisées dans les applications suivantes: production d'eau chaude, chauffage de l'habitat, piscines, séchage de récoltes ...

Les deux dernières sources sont le plus souvent valorisées par la production d'électricité, les calories à haute température étant utilisées pour actionner des machines thermiques couplées à des alternateurs. Elles ne sont intéressantes que dans les pays à fort ensoleillement direct, ce qui n'est pas le cas de la France.

Pour ce qui concerne la France, seules les deux premières sources participent significativement au bilan énergétique national: leurs contributions sont explicitées dans le tableau 1, sur les lignes "solaire thermique" et "pompes à chaleur", pour une valeur totale (en prévisions 2012), de 1 463 kTep, soit pratiquement 1% de la consommation finale d'énergie (154 MTep).

3.2 - Valorisation de la biomasse

La première valorisation de la biomasse est la nourriture qui alimente les espèces vivantes, dont l'homme; mais elle n'est pas comptabilisée dans les bilans énergétiques!

3.2.1 - Le bois-énergie

La plus importante des autres valorisations provient du bois: le bois destiné à la construction et à la menuiserie et le bois-énergie. Seul ce dernier est comptabilisé dans les bilans énergétiques.

Il y a deux manières de valoriser le bois:

a) *la combustion*, la plus ancienne, puisqu'utilisée par les premiers hommes! Cette ressource a toujours intéressé les français car la surface boisée représente plus d'un quart de la France. Ainsi

plusieurs millions de français l'utilisent, dans les cuisinières, les poêles, les chaudières et les cheminées. La récente prise de conscience d'une certaine nocivité de la combustion du bois (émission de particules fines, CO, COV, acroléine, ...) a conduit les autorités à en réglementer sérieusement l'utilisation pour privilégier les systèmes à haut rendement: en effet ce rendement n'est que 10% dans la majorité des cheminées à foyer ouvert, pour atteindre 75% dans les chaudières les plus performantes. Dans ce contexte et ces conditions, la France favorise l'emploi du bois, en particulier dans la mise en place de chaudières alimentant des réseaux de chaleur communaux, ce qui peut paraître contestable du point de vue de l'environnement (les émissions nocives restant de même nature mais malgré tout moindres en quantité) mais défendable du point de vue économique, cette forme d'énergie étant d'origine nationale.

b) *sa transformation pour fabriquer du gaz de synthèse*: elle s'opère à haute température (800 - 900°C) en présence de vapeur d'eau, pour fournir un mélange gazeux constitué d'hydrogène, de monoxyde et dioxyde de carbone et de méthane. C'est le principe ancien - tombé en désuétude puis remis progressivement au goût du jour - des gazogènes du siècle dernier, qui ont fourni le gaz de ville en France jusqu'à la fin des années soixante.

Tableau 1 - Evolution de la production des énergies renouvelables en France (en kTep)

ktep	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2009	2010	2011	2012p	% en 2012
Hydraulique ren.	4 935	6 047	5 417	4 724	6 402	5 905	4 568	5 018	5 406	3 891	5 001	22,4 %
Éolien						8	85	686	855	1 052	1 284	5,7 %
Solaire photovoltaïque						1	2	19	53	179	349	1,6 %
Géothermie électrique					16	18	82	43	13	48	48	0,2 %
Ss-total ENR électriques	4 935	6 047	5 417	4 740	6 402	5 932	4 736	5 766	6 327	5 170	6 682	29,9 %
Solaire thermique		7	17	21	22	23	37	77	64	71	79	0,4 %
Géothermie thermique		5	80	110	132	126	130	84	90	89	94	0,4 %
Pompes à chaleur		8	127	166	123	154	347	1 091	1 203	1 093	1 384	6,2 %
Déchets urbains ren.	301	294	392	589	741	955	1 171	1 169	1 025	1 002	1 018	4,6 %
Bois énergie	8 388	8 541	10 328	9 635	9 463	8 281	8 572	8 997	9 986	8 658	10 028	44,8 %
Résidus agricoles	61	66	77	109	166	235	259	513	343	295	290	1,3 %
Biogaz	52	55	61	73	83	151	216	291	365	410	443	2,0 %
Agrocarburants					161	326	457	2 317	2 256	2 055	2 397	10,7 %
Ss-total ENR thermiques	8 802	8 980	11 082	10 703	10 891	10 250	11 199	14 552	15 332	13 673	15 733	70,3 %
Total ENR	13 737	15 027	16 499	15 443	17 293	16 181	15 935	20 319	21 645	18 796	22 367	100 %

Sources : Ministère de l'Écologie (base de données Pégase⁷ + Bilan énergétique France 2012^{B8} pour 2010-12) .

Le Tableau 1 indique que la production de bois énergie représentait (prévisions 2012) environ 10 Mtep, soit 3,9% de la consommation finale d'énergie primaire (259 Mtep en 1012) en France. Le potentiel, en France, de cette source d'énergie renouvelable est intéressant; il est détaillé dans le tableau 2 et atteint plus de 78 Mtep.

Tableau 2 - Potentiels de biomasses en France⁷

Potentiels de biomasses en France

Origine	Biomasses	Total produit (kTep équivalent)	Supplémentaire disponible (kTep équivalent)
Agriculture	cultures dédiées	14,0	0,0
Agriculture	résidus cultures annuelles	29 687,0	4 438,0
Agriculture	déchets cultures pérennes	942,0	nd
Agriculture	issues de silo	169,0	nd
Agriculture	effluents d'élevage	7 467,0	3 320,0
Forêt	forêts (hors peupleraies)	17 930,0	8 008,0
Forêt	peupleraies	172,0	64,0
IAA	coproduits	2 206,5	29,2
IAA	boues et effluents	3 942,0	nd
	Total	62 529,5	15 859,2

Notes : IAA ; industries agro-alimentaires

Source : L'Observatoire National des Ressources en Biomasse - Evaluation des ressources disponibles en France - Edition 2012 – Les études de FranceAgriMer

3.2.2 - Les biocarburants

Une autre voie de valorisation de la biomasse est son traitement pour fabriquer des biocarburants. Cette voie est récente puisque son développement significatif ne remonte qu'à la fin du siècle dernier aux Etats-Unis avec l'utilisation du maïs pour fabriquer de l'éthanol (bioéthanol). L'Europe se laisse ensuite rapidement convaincre et dès l'année 2000, la Commission Européenne incite les pays membres à inclure au moins 5,75% de biocarburants dans l'essence (idem pour le bio gazole) tout en autorisant des subventions et détaxations ainsi que l'utilisation des jachères à cet effet. Après le maïs, d'autres plantes sont utilisées dans ce but: la betterave, le blé, la canne à sucre, etc Mais les bilans énergétiques, environnementaux et alimentaires (le Mexique, par exemple, s'est rapidement trouvé en déficit de maïs) réalisés sur ces biocarburants dits de "première génération", se sont rapidement révélés mauvais, en comparaison de biocarburants issus d'autres biomasses, comme les ligno-cellulosiques (carburants dits de "deuxième génération") issus de déchets végétaux (comme les tiges de blé) et les biomasses marines -algues et micro algues- (biocarburants dits de troisième génération). Ces deux dernières voies sont en cours de développement mais la première génération est toujours commercialisée. Sa contribution à la production d'énergie en France a représenté 2,4 Mtep en 2012 (cf Tableau 1).

3.2.3 - Traitement des déchets

Une autre source d'énergie est incorporée aux énergies renouvelables: les déchets. Ils peuvent:

- soit produire de la chaleur utile dans les usines d'incinération couplées à des réseaux de chauffage urbain,
- soit produire du biogaz, par digestion anaérobie. Ce biogaz, grâce à sa forte teneur en méthane (50 à 60%), est alors utilisable de trois manières:
 - alimenter une turbine pour produire de l'électricité, solution maintenant mise en œuvre dans certaines usines de traitement des eaux usées,
 - être injecté dans le réseau de gaz naturel. Cette solution fait actuellement l'objet de démonstrations, en particulier en Allemagne.
 - être transformé en hydrogène pour alimenter des piles à combustible, ou une station-service pour des véhicules électriques à pile à combustible.

A noter que le récupération du biogaz de décharge est obligatoire en France depuis 1997. Le tableau 1 montre que le biogaz et l'utilisation des déchets urbains représentent près de 1,5 Mtep/an en France.

⁷ Mémento sur l'énergie - CEA 2013 - p.16

3.3 - Valorisation des photons

Le paragraphe 2.3.5 décrit 4 procédés d'utilisation des photons: le premier produit directement de l'électricité (photovoltaïque) et les trois autres de l'hydrogène.

La valorisation de ces deux formes d'énergie est traitée dans le paragraphe suivant.

3.4 - Valorisation de l'électricité

Cette électricité, dite renouvelable par opposition à l'électricité produite par des centrales alimentées en combustibles fossiles (gaz, fioul, charbon) ou par des centrales électronucléaires, provient des sources décrites précédemment:

- éoliennes,
- solaires photovoltaïques,
- hydraulique,
- géothermiques,
- gravitationnelles (hydroliennes)
- thermique (centrales à biomasse ou biogaz)
- houlomotrice.

Cette électricité a représenté en 2012 (cf. tableau 1) une contribution voisine de 6,7 Mtep, sur les 38 Mtep⁸, toutes électricités confondues, soit 4,3% de la consommation d'énergie en France, en 2012.

Si les productions électriques alimentées à partir d'une énergie stockée (hydraulique, thermique, géothermiques) sont contrôlables, les autres sont, soit aléatoires (éoliennes, photovoltaïques, houlomotrice), soit périodiques (gravitationnelle) et de ce fait doivent être partiellement ou totalement stockées. Mais l'électricité ne se stocke pas en grandes quantités, aussi il est nécessaire de la transformer en un vecteur qui soit stockable, comme l'est **l'hydrogène**. Celui-ci est en effet un gaz aux multiples vertus énergétiques qui est aisément fabriqué via l'électrolyse de l'eau (cf. Fiche 3.2.1): c'est là une des voies les plus intéressantes et prometteuses pour le stockage des énergies renouvelables.

Cette électricité renouvelable peut donc avoir plusieurs destinations selon les cas:

- les réseaux de distribution électrique, que ce soit pour le compte de fournisseurs "d'électricité verte" (huit fournisseurs en France, par exemple) ou pour un réseau national: ce sont actuellement leurs destinations principales.
- les centrales de transformation en hydrogène. Cette voie est en fort développement et plusieurs projets sont en cours dans le monde pour alimenter des zones d'habitation ou des stations-service pour des véhicules à pile à combustible. On peut citer en France:
 - **le projet MYRTE**, en Corse, centrale photovoltaïque de 560 kWc couplée au réseau via un stockage d'hydrogène et une pile à combustible de 100 kW (opérationnel),
 - **le projet GRHYD**, à Dunkerque, démarré début 2014, qui alimentera 200 logements et des bus à partir d'hydrogène issu de sources renouvelables et mélangé à du gaz naturel.

⁸ Mémento sur l'énergie - CEA 2013 - p. 28

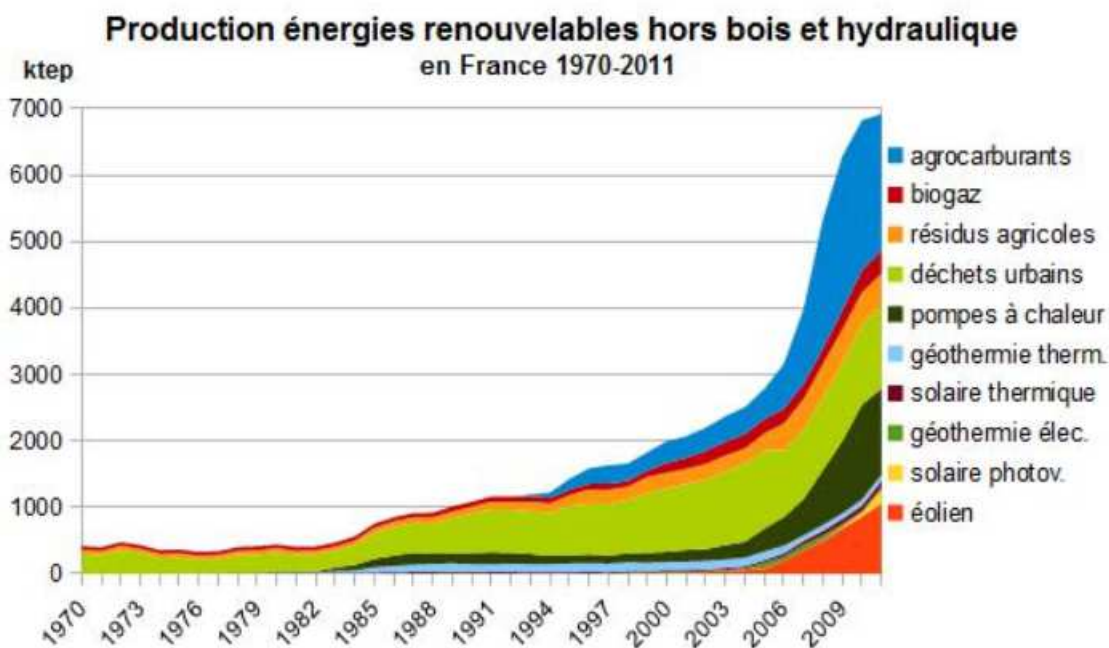


Figure 8 - Production d'énergie renouvelable par filière, en France (kTep)

3.5 - Valorisation de l'hydrogène

Dans le cas d'une production d'hydrogène, plusieurs utilisations sont possibles:

- alimenter un moteur thermique (cf. Fiche 5.1.1),
- alimenter une turbine (cf. Fiche 5.1.2),
- alimenter une pile à combustible (cf. Fiches 5.2.1 à 5.2.6 et Fiches 9.1 et 9.2),
- injecter cet hydrogène dans le réseau de gaz naturel (mélange hydrogène-méthane appelé hythane): ces deux gaz sont miscibles en toutes proportions et des travaux récents ont montré qu'un ratio de 20% était acceptable sans modification du réseau.
- le commercialiser comme "hydrogène marchand" pour des applications industrielles.

4. Conclusions

Des trois sources primaires d'énergie à notre disposition -fossiles, nucléaire et renouvelables-, seules ces dernières sont assurées d'une disponibilité à l'échelle de la durée de la vie sur terre, estimée à environ 4 milliards d'années. Or cette ressource des renouvelables, -pour l'essentiel d'origine solaire- représente potentiellement des milliers de fois notre consommation, elle peut donc être considérée comme illimitée comparée aux quelques siècles prévisibles pour les ressources fossiles et nucléaires (dans le cas de la filière "fission" à base d'uranium).

L'exploitation des énergies renouvelables produit essentiellement de **l'électricité** et donc alimente le réseau électrique tout en exigeant, en parallèle, un stockage de la partie non consommée. Faute de stockage suffisant quand la production est excédentaire par rapport à la demande du réseau, une partie de cette électricité est perdue, ce qui est parfois le cas dans certains pays.

La manière la plus élégante, propre et économe d'effectuer ce stockage est d'électrolyser de l'eau pour produire de **l'hydrogène** qui peut être soit injecté dans le réseau de gaz naturel (mélange gaz naturel-hydrogène appelé "hythane"), soit stocké (voir fiches 4.2, 4.3 et 4.4). Dans ce dernier cas, il est alors disponible, soit pour alimenter des véhicules électriques à pile à combustible, soit pour produire à nouveau de l'électricité destinée à effacer des pointes de demande, en particulier dans les réseaux iliens, même si cette opération se fait au détriment d'une perte sensible de rendement (perte de l'ordre de 50%, le rendement d'une pile à combustible).

Si l'exploitation des énergies renouvelables s'est limitée historiquement à la combustion du bois et à l'exploitation de l'énergie hydraulique pour une fraction de la consommation globale d'énergie, la récente prise de conscience (1) de l'épuisement proche des ressources fossiles, (2) des limites d'acceptabilité du nucléaire et (3) des conséquences de ces exploitations sur l'environnement,

conduit, un peu partout dans le monde, à une volonté politique d'exploitation des énergies renouvelables. La figure 8 illustre cette prise de conscience en France et le tableau 3 l'illustre au niveau mondial.

Tableau 3 - Evolution de la capacité installée mondiale d'origine renouvelable⁹

Monde World	Source	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Puissance éolienne installée cumulée (GW)* Cumulative wind installed capacity (GW)*	GWEC**	5	17	59	194	238	282 (dont 5,4 offshore)
Puissance PV installée cumulée (GWc) Cumulative PV installed capacity (GWc)	EPIA	0,58	1,4	5,36	40,67	71,06	102,16
Puissance solaire thermique installée cumulée (GWth) Cumulative solar thermal installed capacity (GWth)	IEA	ND	ND	ND	196	238,8	274,5
Puissance géothermie installée (GW) Cumulative geothermal installed capacity (GW)	IEA Geothermal	6,8*	8,0*	8,9*	10,7	11,1	11,2

* Capacité installée pour 15 pays avec actualisation pour les pays du GIA sur la période 2007-2011 - **Installed capacity for 15 countries with updates for GIA countries for 2007-2011**

GIA: Geothermal Implementing Agreement

** GWEC - Global World Energy Council

Source : GWEC (Global World Energy Council)

⁹ Mémento sur l'énergie - CEA 2013 - p. 13