

n°251 - juin 2018

Etat et perspectives de développement des Energies renouvelables (EnR) dans le monde, en Europe et en France

Mots clés associés : climat et énergie | effet de serre (gaz) | énergie | énergies renouvelables | technologie | transition

Résumé

Cet article a pour objet de présenter la place actuelle des EnR. Ce n'est qu'un élément de réflexions sur les stratégies énergétiques, qu'il s'agisse de considérations relatives à la production d'énergie ou à la gestion de la demande en énergie (usages, modes de vie et économies d'énergie).

Le présent article présente l'état des technologies des diverses énergies renouvelables, la stratégie de leur développement, dans le monde, en Europe et en France, les progrès accomplis et les difficultés rencontrées.

Neuf catégories d'EnR sont abordées :

1. le bois-énergie (biomasse physique), les biocarburants et le biogaz (et les déchets renouvelables) ;
2. l'hydroélectricité ;
3. l'électricité éolienne ;
4. l'électricité solaire photovoltaïque (PV) ;
5. l'énergie solaire thermique ;
6. l'énergie solaire à concentration (ou thermodynamique) ;
7. l'énergie géothermique ;
8. l'énergie des pompes à chaleur ;
9. les énergies « marines ».

Le niveau d'avancement et de compétitivité des EnR est très différencié selon les technologies, ainsi que leur coût, qui varie aussi beaucoup selon la ressource, le potentiel local et la géographie. Il y a des considérations à prendre en compte, techniques, financières, politiques, de stratégie énergétique et de lutte contre le changement climatique.

Cet article n'a pour objet que d'éclairer la place actuelle et le degré de maturité des EnR. Ce n'est qu'un élément de réflexions sur les stratégies énergétiques, qu'il s'agisse de considérations relatives à la production d'énergie ou à la gestion de la demande en énergie (usages, modes de vie et économies d'énergie).

Auteurs

Boyé Henri

Ecole Polytechnique IGPEF, a passé sa carrière dans l'énergie, au Ministère français chargé de l'énergie, puis à EDF à l'international, directeur Afrique, délégué au Maroc. Au CGEDD, coordonnateur Energie et Climat, Président du Projet EMACOP (Energies Marines Côtières et Portuaires).

Aujourd'hui Consultant en énergie et électrification en Afrique, expert en énergie solaire, hydroélectricité, énergies marines, maîtrise de l'énergie.

Denègre Jean

Ecole Polytechnique, Ingénieur IGN de 1967 à 1986 et de 1993 à 2003 (directeur de Ecole nationale des sciences géographiques ENSG-IGN de 1996 à 2003, ingénieur à l'Equipement (Cnig - Conseil nat. de l'info. géographique, de 1986 à 1993) et de 2003 à 2008 (ingénieur IGPEF au CGEDD). Retraite en 2008, puis bénévole à l'Académie des technologies (2008-2018) c. secrétaire de la Commission Energie et changement climatique (CECC de 2008 à 2016) & membre-expert de la CECC à/c 2016.

Texte

Contrairement à ce qu'on pensait à la fin du siècle dernier, les ressources énergétiques fossiles sont encore abondantes et bon marché. Il n'y a pas de convergence entre la fin des combustibles fossiles et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui le choix de vivre en émettant aussi peu de gaz à effet de serre que possible passe par les énergies sans émissions et donc majoritairement les énergies renouvelables.

Notre planète Terre a de plus en plus besoin d'eau et d'énergie, du fait de la croissance de la population et des consommations. L'énergie est indispensable à la vie, au développement économique et à l'amélioration des conditions de vie. A titre d'exemple, en 200 ans, l'espérance de vie moyenne des Français est passée de 30 ans en 1800 à 80 ans en 2000. En même temps la consommation d'énergie a été multipliée par 14 (par Français). Aujourd'hui, le monde compte 7 milliards d'habitants, dont près de 2 milliards n'ont pas l'électricité et une espérance de vie de l'ordre de 36 ans seulement.

Les ressources en énergie fossiles émettrices de CO₂, (charbon, hydrocarbures, gaz naturel, pétrole,) sont consommées à un rythme croissant, et les réserves sont inévitablement en voie d'épuisement, au détriment des générations à venir. Il y a consensus pour économiser ces précieuses ressources fossiles, et pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de CO₂ en particulier ; cause anthropique aggravant le changement climatique.

La France s'est fixée comme objectif de réduire sa dépendance à la production d'énergie nucléaire tout en luttant contre les causes du changement climatique, donc sans devoir recourir aux énergies carbonées productrices importantes de GES.

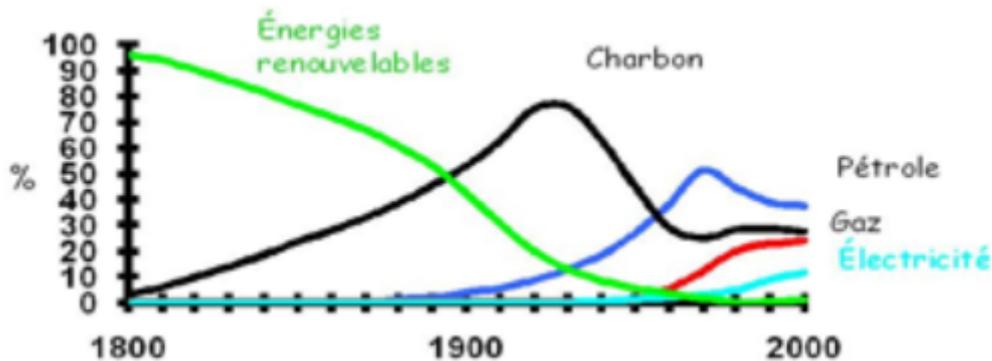
Définition : qu'entend-on par EnR ?

Ce sujet est très vaste et complexe, car il y a de nombreuses formes d'énergie renouvelables possibles, qui sont diverses et à un niveau de développement technologique différent, et dont la

compétitivité et le coût de revient ne sont pas homogènes.

Rappelons d'abord que les **EnR**, ce n'est pas nouveau, et que jusqu'à l'ère du charbon puis du pétrole triomphants, l'essentiel de l'énergie venait de la traction animale et des moulins (la traction animale en l'absence de tracteur reste un recours énergétique important pour beaucoup d'agriculteurs de pays pauvres même aujourd'hui).

Le diagramme ci-après (qui est en pourcentages et pas en valeur absolue) montre que les énergies renouvelables ont dominé l'histoire de l'humanité. Avant le 19ème siècle, on utilisait le bois, l'hydraulique et l'éolien par moulins, la traction animale et les esclaves. Puis est apparu le charbon et la machine à vapeur, et au 20ème siècle, le pétrole, le gaz, l'hydroélectricité, l'énergie nucléaire et les EnR « modernes ».



1 - La situation (actuelle et future) du monde en matière des EnR et la situation de l'Europe

1.1. Stratégie et Objectifs européens.

L'énergie constitue un élément essentiel de la stratégie européenne Europe 2020. Celle-ci vise à promouvoir une « croissance intelligente, durable et inclusive » grâce à une meilleure coordination de la politique nationale et européenne.

Les objectifs suivants pour 2020 ont été définis en matière énergétique

- porter à 20 % la part des sources d'énergie renouvelables dans la production énergétique ;
- réduire la consommation d'énergie primaire de 20 % en améliorant l'efficacité énergétique ;
- réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport aux niveaux de 1990.

En fait, cette référence au 20-20-20 est en cours de révision. La référence est maintenant plutôt 2025, car la période précédente inclut l'élargissement de l'Europe, la réunification de l'Allemagne et le changement industriel à l'Est du fait de la sortie du système soviétique.

En 2014, la Commission européenne a présenté un nouveau cadre pour l'énergie et le climat à l'horizon 2030. Les chefs d'État et de gouvernement de l'UE ont entériné les principaux objectifs et la structure de ce cadre. **La proposition vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport aux niveaux de 1990.** Cet objectif contraignant pour l'ensemble de l'UE vise à faire passer la part des **énergies renouvelables à au moins 27 % de la consommation totale** et pose de nouvelles ambitions pour les politiques en matière d'efficacité énergétique.

Ces objectifs européens sont ambitieux et ont une dimension politique et volontariste. Ils s'inscrivent dans la stratégie de réduction des GES liés à la lutte contre les changements climatiques qui doit faire l'objet d'une nouvelle proposition de la Commission pour début 2019 avec pour **objectif que**

L'Europe devient un territoire « zéro carbone » à horizon 2050.

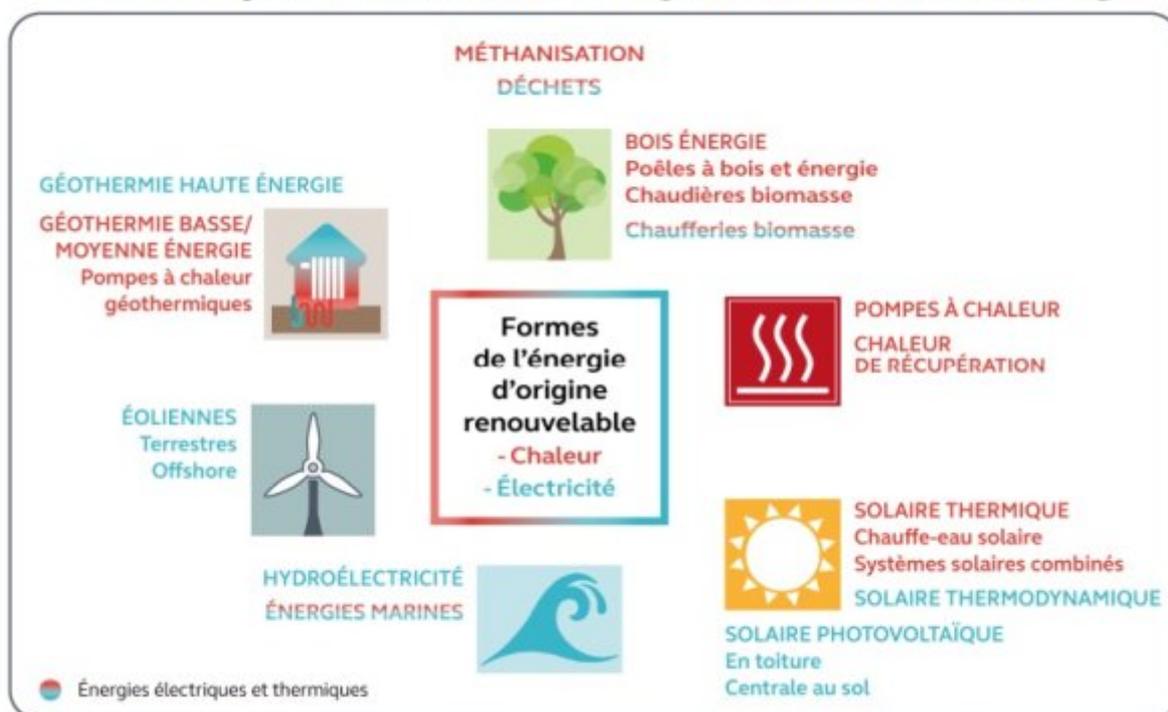
1.2. Caractéristiques générales des ENR

Souvent l'utilisation des EnR est très locale et tiendra compte de la géographie. C'est le cas de l'énergie hydroélectrique dans les zones alliant débit d'eau et hauteur de chute, géothermique dans des zones quasi volcaniques ou disposant d'un sous-sol chaud comme le Dogger en région parisienne, l'éolien dans les zones les plus ventées, le solaire dans les régions mieux ensoleillées... D'autre part la plupart des EnR, en particulier le soleil et le vent ont un caractère d'intermittence, ce qui impose un stockage de l'énergie ou une « hybridation » coûteuse. La biomasse n'est pas toujours exploitée de façon renouvelable, et il peut y avoir des conflits d'usage.

Le coût de revient des EnR est donc très varié selon les situations, et la plupart des EnR sont subventionnés, même si leur coût baisse très rapidement.

Par ailleurs il faut prendre en compte que les situations et les conditions politiques et juridiques, les financements et les subventions mobilisées pour les EnR, sont très différents selon les pays, et l'analyse et les comparaisons entre pays se doit d'en tenir compte. Pour établir une liste des EnR, et ne pas faire un « inventaire à la Prévert » on s'est appuyé sur l'ouvrage édité en février 2017 par le service statistique du ministère de la Transition Ecologique (Commissariat général au développement durable) et intitulé « Chiffres-clés des énergies renouvelables (EnR) - édition 2016 - ». On entend, par énergies renouvelables (EnR), une dizaine de formes d'énergie dont l'analyse sera développée au chapitre suivant : le bois-énergie (biomasse), les biocarburants et le biogaz (et les déchets renouvelables), l'hydroélectricité, l'électricité éolienne, l'électricité solaire photovoltaïque (PV), l'énergie solaire thermique, l'énergie solaire à concentration (ou thermodynamique), l'énergie géothermique, l'énergie des pompes à chaleur, les énergies « marines ». L'énergie nucléaire qui produit de façon décarbonée de la chaleur n'est pas abordée dans cet article car ce n'est pas une énergie renouvelable.

Schéma n° 1 : présentation des sources d'énergies renouvelables et de leurs usages



Source : Cour des comptes

On analysera les perspectives de développement des EnR dans le monde, notamment quand elles

peuvent fournir de l'énergie électrique. D'autres EnR, biomasse et géothermie, solaire thermique fournissent essentiellement de la chaleur. La production de chaleur joue un rôle important dans les émissions de GES.

Les énergies renouvelables peuvent être définies comme faisant appel à des ressources illimitées : l'eau, le vent, le soleil, mais pouvant varier à long terme en fonction du climat, et n'émettant pas de gaz à effet de serre, car ne faisant pas appel à une énergie fossile, susceptible d'épuisement.

Cependant, une caractéristique de certaines EnR électriques est **leur intermittence** (au moins pour les principales d'entre elles : le solaire et l'éolien : variabilité dans le temps et non disponibilité de manière continue). D'où la nécessité de les « adosser » à des technologies capables de générer de l'électricité en tout temps, de jour comme de nuit, qu'il vente ou non, que le soleil brille ou non (mise en réseaux décentralisés - les GRID- systèmes de stockage d'énergie, etc.). Les technologies des batteries, des électrolyseurs, des piles à combustibles, des biocarburants sont en progrès constants, mais offrent des capacités limitées et restent complexes, en particulier dans le domaine des catalyseurs.

L'hydroélectricité et la géothermie ne sont pas intermittentes, car disponibles et capables de produire 24h par jour et de façon continue.

Le besoin d'énergie du monde entier d'ici 30 ans environ est évalué à 22,3 TWh (14 TTEP, Tératonnes équivalent pétrole) d'après l'analyse faite par l'Association internationale de l'énergie (AIE) [1].

L'électricité, faut-il le rappeler, est en passe de gagner le domaine des transports (probablement en partie avec de l'hydrogène ou du méthane pour les poids lourds et les navires), le domaine du chauffage des bureaux et des logements (avec une concurrence forte du gaz), et a gagné depuis longtemps les domaines de l'éclairage, de la communication (informatique et télécom), de l'électroménager (lavage, cuisson, conservation etc.), de la signalisation automatique. C'est sans doute pourquoi l'énergie électrique, relativement facile à transporter, à installer et à consommer, est très demandée.

La répartition géographique mondiale des quatre filières principales (**éolien, biomasse, hydroélectricité, énergie solaire PV**) est présentée ci-dessous.

World Potential Renewable Energy

Wind Energy



Biomasse



Million Tonnes of Oil Equivalent



Hydroelectricity

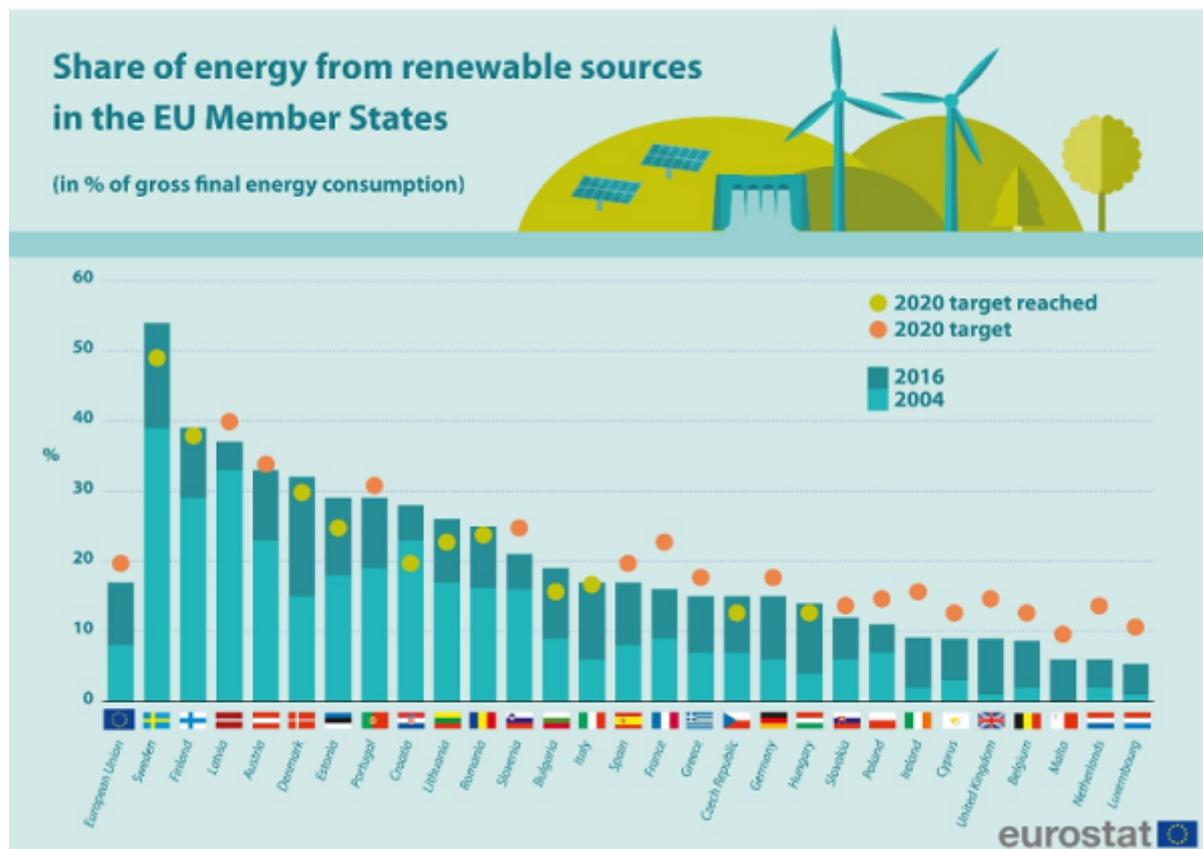


Solar Energy



L'EnR en haut à gauche est celle de l'éolien (la plus modeste des 4, avec le solaire PV). L'ENR en haut à droite est celle du bois-énergie. Les dimensions des cercles sont en Mtep (chiffres de 2005)

Le tableau ci-après présente la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergies des pays membres de l'Union Européenne (chiffres de 2016 et objectifs pour 2020). (La Norvège qui n'appartient plus à l'UE n'apparaît pas dans ces statistiques)



La Suède, la Finlande et la Norvège seront en 2020 (comme aujourd’hui), les champions européens des EnR, en pourcentage, du fait d’une très bonne dotation en hydroélectricité, tandis que l’Espagne et la France occuperont respectivement les 14e et 15e rangs des pays de l’UE, quand mêmes supérieurs à ceux de l’Allemagne et du Royaume-Uni.

L’électricité en Norvège est presque entièrement produite au moyen de l’énergie hydroélectrique. En fonction de la pluviométrie et du pack neigeux annuelle, elle peut représenter jusqu’à 99 % de l’électricité du pays. En 2009, la production totale a atteint 132,8 TWh, dont 95,7 % provenant de la filière hydroélectrique.

La Norvège produit plus que la Finlande en EnR (au moins 43 %).

<http://ec.europa.eu/eurostat/statis...>

2 - Analyse de 9 catégories d’EnR dans le monde

2.1. Le bois-énergie(biomasse solide) les biocarburants, le biogaz et les déchets renouvelables

L’énergie issue de la biomasse comprend trois familles principales :

- Le bois-énergie ou biomasse solide,
- Le biogaz
- Les biocarburants.

Ce sont tous des matériaux d’origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d’électricité ou de carburants.

La **biomasse** était jusqu’au XVIII ème siècle la principale ressource énergétique utilisée par l’humanité, en particulier sous forme de **bois-énergie** ; c’est encore aujourd’hui, et de loin, la

principale énergie renouvelable, selon l'Agence Internationale de l'Energie, surtout dans les pays en développement.

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO : Food and Agriculture Organization, UNO), relayée par l'Office National des Forêts français, reste la principale source d'information sur la **forêt mondiale**. Celle-ci occuperait environ 4 000 millions d'hectares, soit encore 40 millions de km² de forêt et d'espaces boisés.

Au sein de cet ensemble, une dizaine de pays occupent environ 2600 millions d'hectares. Ce sont :

- la Russie : 809 millions ha
- le Brésil : 479 millions ha
- le Canada : 310 millions ha
- les USA : 303 millions ha
- la Chine : 197 millions ha
- l'Australie : 164 millions ha
- le Congo (RDC) : 134 millions ha
- l'Indonésie : 88 millions ha
- le Pérou : 69 millions ha
- l'Inde : 68 millions ha

(Chiffres 2005, abstraction faite de la déforestation intervenue depuis, qui est effectivement très préoccupante - ainsi les surfaces forestières ont reculé, de 1990 à 2005, de 19 % en Amérique centrale, de 9,1 % en Afrique et de 6,6 % en Amérique du Sud, tandis qu'elles progressaient en moyenne de 1,2 % pour l'ensemble de l'Europe, notamment en France.)

C'est dire que le potentiel d'énergie-biomasse présent dans les pays du monde entier, est très important. Si on extrapole les modestes chiffres français (15,5 millions d'ha en 2009 pour une production équivalente à 10.2 Mtep en 2010), pour le monde entier (près de 4 milliards d'ha), on obtient le chiffre d'environ 2666 Mtep, soit 2.66 GTep, à comparer aux 22 GTep cités précédemment.

En Europe, l'ordre de grandeur de la biomasse (couverture forestière) est de 1,6 Mkm², dominé par les couvertures forestières de Suède (275 280 km²), de Finlande (225 000 km²), d'Espagne (179 150 km²) et de France (155 554 km² pour la métropole [2]).

L'exemple de l'Autriche est intéressant, puisque celle-ci indiquait, en 2012, 20 % de son énergie [3] issue de la biomasse (couvert forestier 38 620 km²), et au total, 34 % de son énergie issue des EnR (biomasse, hydroélectricité, solaire et éolien). De plus, les Autrichiens ont réussi à faire baisser leur facture pétrolière de façon notable. Le tout a un coût bien inférieur à celui des Allemands. Ainsi, le prix de l'électricité est un tiers moins élevé que chez leurs voisins du Nord.

Les Autrichiens exploitent de façon adroite leur biomasse, mais il est possible qu'ils aient atteint une limite. Ils ont un Plan B : recourir au gaz russe avec une grande entreprise, l'OMV [4], alliée privilégiée de Gazprom.

Et en France ?

L'Académie des technologies a émis un avis le 7 juillet 2014 qui prévoit l'utilisation de 15 Mtep de filière Bois-énergie et 8,2 Mtep de chaleur récupérée des centrales nucléaires, dans le cas de construction neuves de centrales nucléaires, voire de la rénovation en profondeur d'installations existantes. Ces deux actions iraient de pair avec la construction de réseaux de chaleur.

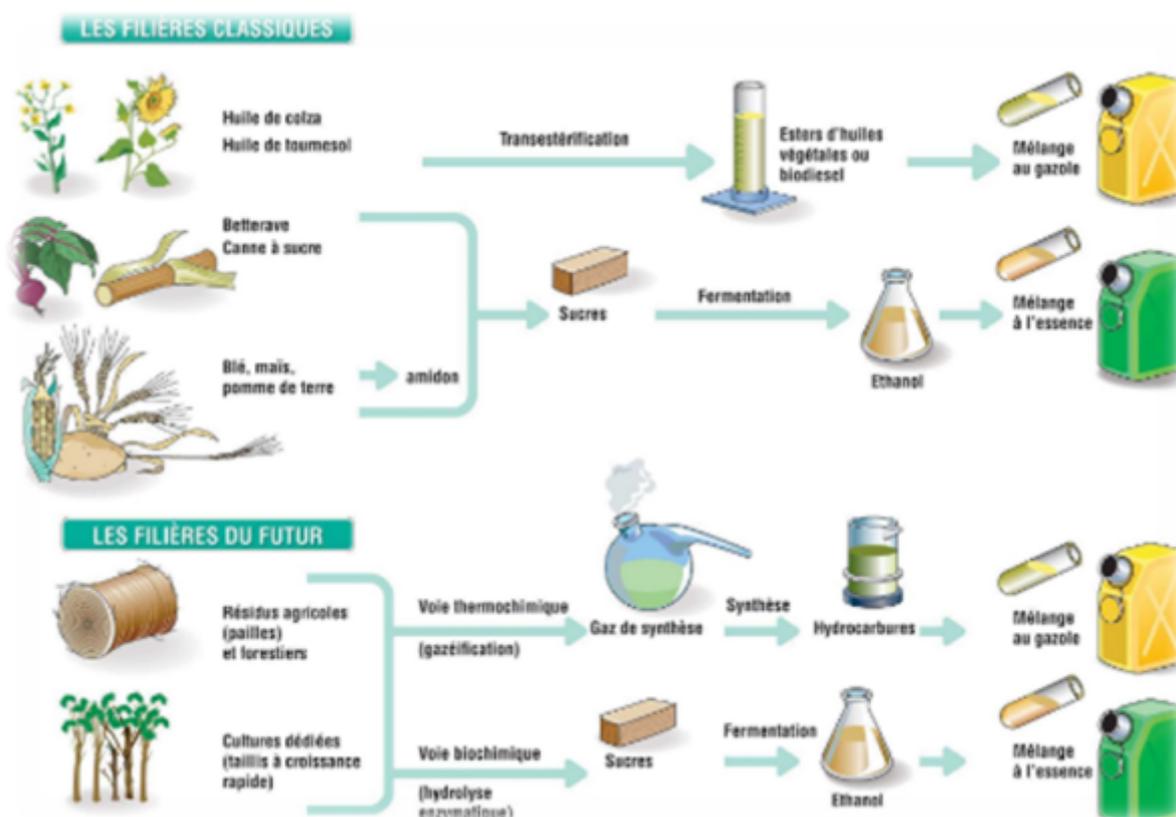
Du fait, notamment, des conditions climatiques ayant entraîné une relativement faible utilisation du bois de chauffage, la biomasse solide française affiche un retard important en 2015. (Extrait des chiffres-clés du CGDD sur les énergies renouvelables).

Les biocarburants et le biogaz

Les biocarburants et le biogaz, sont des matériaux, liquides ou gazeux, d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants.

L'illustration ci-dessous montre les deux groupes de filières pour les biocarburants (les filières classiques) biodiesel et éthanol, à partir de produits alimentaires - et celles du futur - résidus agricoles (paille) et forestiers, et cultures dédiées (taillis à croissance rapide) non alimentaires. Les filières classiques, à partir de produits alimentaires, semblent condamnées, étant donné la priorité donnée dans les cultures à l'alimentation pour les êtres humains. Seules seront conservées les filières du futur.

Toutefois, selon les prévisions de l'AIE et de l'OCDE [5] la croissance de la production des biocarburants devrait continuer encore longtemps au niveau mondial. Mais il est impossible de préciser aujourd'hui (en mars 2018) le volume et la date d'apparition de ces filières du futur.



Cette image montre les deux groupes de filières pour les bio-carburants (les filières classiques - biodiesel et éthanol, à partir de produits alimentaires - et celles du futur - résidus agricoles (paille) et forestiers, et cultures dédiées (taillis à croissance rapide) non alimentaires).

Les biocarburants dans le monde et en France

(Extrait du rapport de Bruno Jarry, de l'Académie des technologies, intitulé « le Biogaz en 10 questions », 2016)

La **Chine** est l'un des pays qui a fait appel très tôt, au cours de son histoire, à la technologie du biogaz et dès la fin du XIX^{ème} siècle, des fermenteurs rudimentaires ont été construits dans les zones côtières de la Chine du Sud.

La dernière vague du biogaz se produisit vers la fin des années 1970 et le début des années 1980, lorsque le gouvernement chinois considéra la production de biogaz comme un emploi rationnel et efficace des ressources naturelles dans les milieux ruraux. La production de biogaz représenta un aspect important de la modernisation de l'agriculture.

De nombreux pays en voie de développement ont utilisé ces mécanismes pour monter des projets locaux en milieu rural mais aussi des projets industriels souvent très importants, en particulier en Amérique du sud. On peut à titre d'exemple le contrat passé par la municipalité de la ville de Mexico pour récupérer le biogaz de sa décharge d'ordures de Bordo Poniente, aujourd'hui fermée, qui a accumulé 72 millions de tonnes de déchets au cours de ses vingt ans d'utilisation.

Aux USA, le Connecticut a été le premier état à donner l'exemple, en 2011, en adoptant une loi obligeant les producteurs à envoyer leurs déchets organiques dans une unité de valorisation. Le Vermont a voté une loi similaire en 2012 : dans le Green Mountain State, le moindre déchet organique se verra refuser l'accès aux centres d'enfouissement à partir de 2020. Le Massachusetts, enfin, doit appliquer la même interdiction aux producteurs de plus d'une tonne de résidus par semaine dès le 1er juillet 2014.

Après San Francisco, Seattle et Portland, New York devrait être la 4^{ème} métropole à interdire l'enfouissement des déchets organiques. L'interdiction, qui devait être prise en 2014, devrait toucher les déchets produits par les hôpitaux, les hôtels et plus largement tous les producteurs émettant plus d'une tonne de résidus alimentaires par semaine et les orienter vers le compostage ou la méthanisation.

En Europe, l'**Allemagne**, l'**Autriche** et le **Danemark** produisent une grande partie de leur biogaz dans les exploitations agricoles, en utilisant l'énergie des récoltes, des sous-produits de l'agriculture et des lisiers, alors que le **Royaume-Uni**, l'**Italie**, la **France** et l'**Espagne** utilisent surtout les gaz résultant de l'enfouissement des déchets.

Le débat, tant en France qu'en Europe tourne autour de la définition de la deuxième génération - arguant justement de ce que les technologies prévues à partir de la biomasse ne sont pas encore prêtes, les sucriers essaient de faire avaliser la mélasse comme source de biomasse, bien qu'elle ait toujours été considérée comme « de première génération ».

L'**Allemagne** a mis en place dès le début des années 90 un plan de développement du biogaz basé sur l'utilisation du maïs comme source de carbone, éventuellement mélangé au lisier d'origine animale. Cette matière première standardisée présente l'avantage d'un fort pouvoir méthanogène en fermenteur. Accompagné par des conditions de rachat de l'électricité produite très incitatives, ce développement a permis à l'Allemagne de prendre rapidement la place de premier producteur européen avec 6,4 Mtep produites en 2012 par 7515 installations. Le rythme d'accroissement du nombre d'unités industrielles a toutefois fléchi depuis 2012, du fait de la décision du gouvernement de diminuer de façon sensible les tarifs de rachat au 1er janvier 2012. La majorité du biogaz produit sert à fabriquer de l'électricité (27,2 TWh fin 2012).

Quant à la **France**, elle a fixé 7,5% de biogaz en 2020 (Europe : 5 %), suite au lobbying des producteurs, objectif très volontariste. En 2017, le parc bioénergies a progressé de 1,6 % et plusieurs projets sont à l'étude.

Concernant les bioénergies il y a un problème de concurrence alimentation/énergie qui mériterait d'être rappelé (cf.-le cas hausse prix du maïs et alimentation élevages aux USA). Les bio-carburants

sont-ils rentables sans subvention comparés au pétrole ? Ce n'est pas le cas aujourd'hui, pour l'éthanol, limite pour le biodiesel, on espère de nouvelles générations de biocarburants (bio algues, cellulose).

2.2. L'hydroélectricité

Les barrages créent des retenues d'eau sur les rivières. Grâce à des turbines, ils permettent de produire de l'électricité d'origine renouvelable avec très peu d'émissions de CO². C'est l'énergie hydro-électrique, la « houille blanche ».

A la différence de l'énergie éolienne ou à l'énergie solaire, il est possible de la stocker (réserve d'eau) et de produire de l'électricité quand il y a besoin, par simple commande de l'ouverture des vannes. Ce stockage naturel d'énergie par l'eau dans les retenues est la forme la plus compétitive de stockage de l'électricité, par les STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage), très importantes pour les réseaux électriques et pour l'insertion des autres énergies renouvelables modernes (solaire et éolien), qui sont par nature intermittentes. Les barrages hydroélectriques permettent une production réglable d'électricité qui est permise par une quantité d'eau considérable stockée dans le réservoir et permet de stabiliser les réseaux électriques.

La ressource est le produit de la pluie, du bassin versant et de la hauteur de chute
Il y a eu beaucoup d'évolution technique depuis des siècles, avec conversion d'énergie potentielle en énergie mécanique, puis en énergie électrique.

Il faut bien souligner la spécificité de chaque site hydroélectrique : installations au fil de l'eau, ouvrages de chutes, micro-centrales, barrage béton -poids, voutes, voutes multiples-, en enrochement, en terre...et différents types de turbines pour transformer l'énergie potentielle de l'eau en électricité.

La taille des centrales hydroélectrique va de pico centrales de petite taille, à de grandes installations, la plus grande existante aujourd'hui est en Chine, Les Trois Gorges, sur le Fleuve Yang Tsé, la plus grande potentiellement est sur le site d'INGA, fleuve Congo, avec 40 000 Mégawatts, qui pourrait produire de l'énergie pour une bonne partie de l'Afrique.

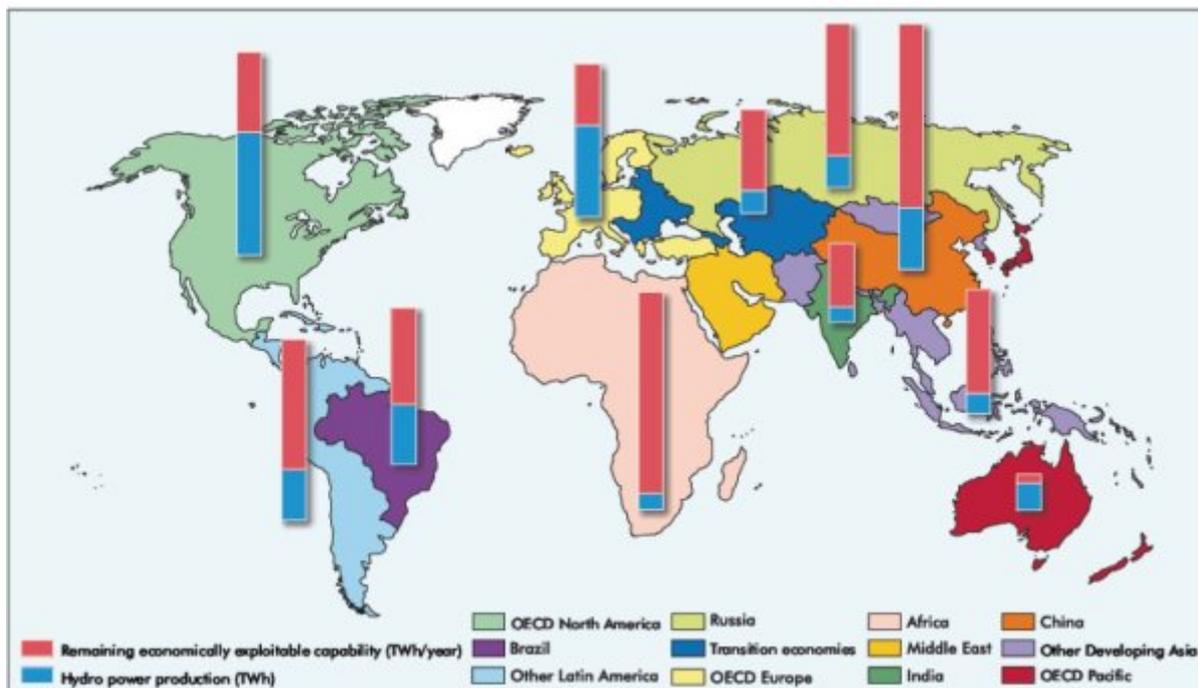
L'énergie hydroélectrique, dans le monde, avec une production annuelle de 2100 TWh, représente actuellement 20 % de la production électrique totale et 7 % environ de toute l'énergie consommée.

La répartition de l'équipement hydroélectrique mondial (en équivalent de production annuelle) est actuellement environ de 500 Mtep [6] avec, par grandes régions :

- Amérique du Nord : 100 Mtep
- Brésil et autres pays d'Amérique du Sud : 100 Mtep
- Europe : 80 Mtep
- Russie et Europe orientale : 100 Mtep
- Chine : 40 Mtep
- Inde : 10 Mtep
- Asie et Océanie : 30 Mtep
- Afrique : 10 Mtep
- Australie, Japon et Nlle Zélande : 30 Mtep
- Indonésie : 15 Mtep

La carte ci-dessous (source CIGB-ICOLD) présente, de façon schématique le gisement d'énergie hydroélectrique dans les régions du monde, avec dans les barres verticales en bleu la production hydroélectrique existante, et en rouge la capacité économiquement exploitable. On voit que

l'Amérique du Nord et l'Europe ont déjà exploité près des deux tiers de leurs capacités, mais que l'Asie, l'Amérique latine et surtout l'Afrique sub-saharienne conservent un énorme potentiel d'hydroélectricité renouvelable à développer.



Pourtant le développement des barrages est controversé, au Nord comme au Sud, du fait des impacts potentiels, et les projets nouveaux se heurtent souvent à des oppositions parfois fortes.

Concernant l'hydro-électricité la plupart des bons sites sont peut-être équipés en France, mais il y a un potentiel considérable dans beaucoup de PED (fleuve Congo, et fleuves himalayens asiatiques)

Et en France ?

Le secteur de l'hydroélectricité en France bénéficie d'un potentiel important grâce à la présence de plusieurs massifs montagneux : Alpes, Pyrénées, Massif central. Ce potentiel français est déjà exploité en très grande partie, depuis les années 1970, et il n'y a plus beaucoup de projets de grands barrages, mais il subsiste un gisement non négligeable à exploiter en petite hydraulique.

Avec une capacité installée de 25 517 MW, la filière hydraulique est la deuxième source d'électricité française, et la première parmi les sources d'électricité renouvelable.

La production hydroélectrique en France représentait 10,8 % de la production électrique totale en 2017, (faible pluviométrie) contre 13,8 % en 2013, année beaucoup plus pluvieuse.

La France était en 2016 le 2ème pays européen pour sa production hydroélectrique avec 10,8 % de la production européenne, derrière la Norvège et devant la Suède ; au niveau mondial, elle figurait au 12ème rang avec 1,6 % du total mondial. En termes de puissance installée, elle était fin 2016 au 2ème rang européen avec 11,4 % du total européen, après la Norvège et au 9ème rang mondial avec 2,0 % du total mondial.

2.3. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie renouvelable tirée du vent. Lorsque les **éoliennes** sont équipées d'un générateur électrique, on peut aussi les appeler des **aérogénérateurs**. Plusieurs éoliennes peuvent être regroupées sur un même site pour former un **parc éolien**.

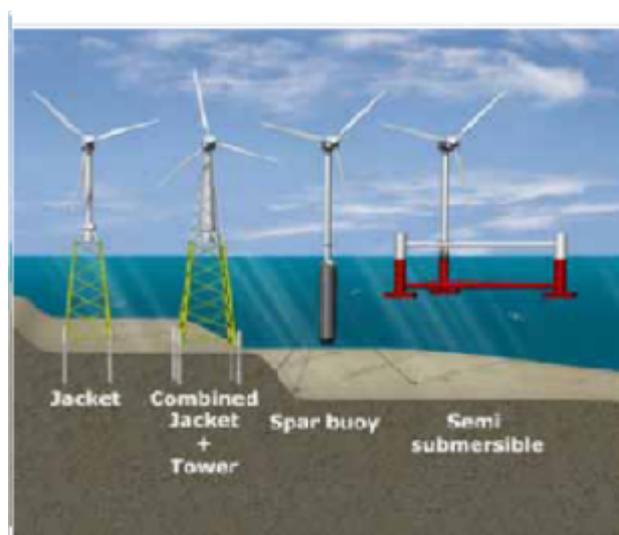
L'énergie éolienne, sous la forme d'électricité produite par des aérogénérateurs et injectées sur les réseaux électriques, est actuellement la source d'énergie primaire qui croît le plus rapidement dans

le monde.

Il est important de noter que :

- La puissance d'une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent,
- Le gisement éolien est très variable selon la géographie. On le mesure souvent par le nombre d'heures annuel de fonctionnement à pleine puissance (qui peut atteindre 4000 heures par an dans les meilleurs sites, comme le détroit de Gibraltar et plus sur certains sites très favorables),
- La vitesse moyenne du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol et en bord de mer et offshore.

Il y a des éoliennes terrestres, et marines. Il y a deux familles d'éoliennes marines : les « off- shore » et les « flottantes » (voir image ci-après, consacrée aux éoliennes situées sur le littoral).



● ≥ 30 TWh ● 10 à 30 TWh ● 1 à 10 TWh ● < 1 TWh
Production éolienne en Europe en 2016

Doc. RTE 2017

L'Europe est assez avancée en matière d'éolien, grâce notamment aux pays scandinaves, à l'Espagne et à l'Allemagne. De toute façon, il manque une énergie complémentaire s'adossant à l'énergie éolienne intermittente, qui a produit 5 % de l'énergie consommée en 2017 dans les pays d'Europe [7].

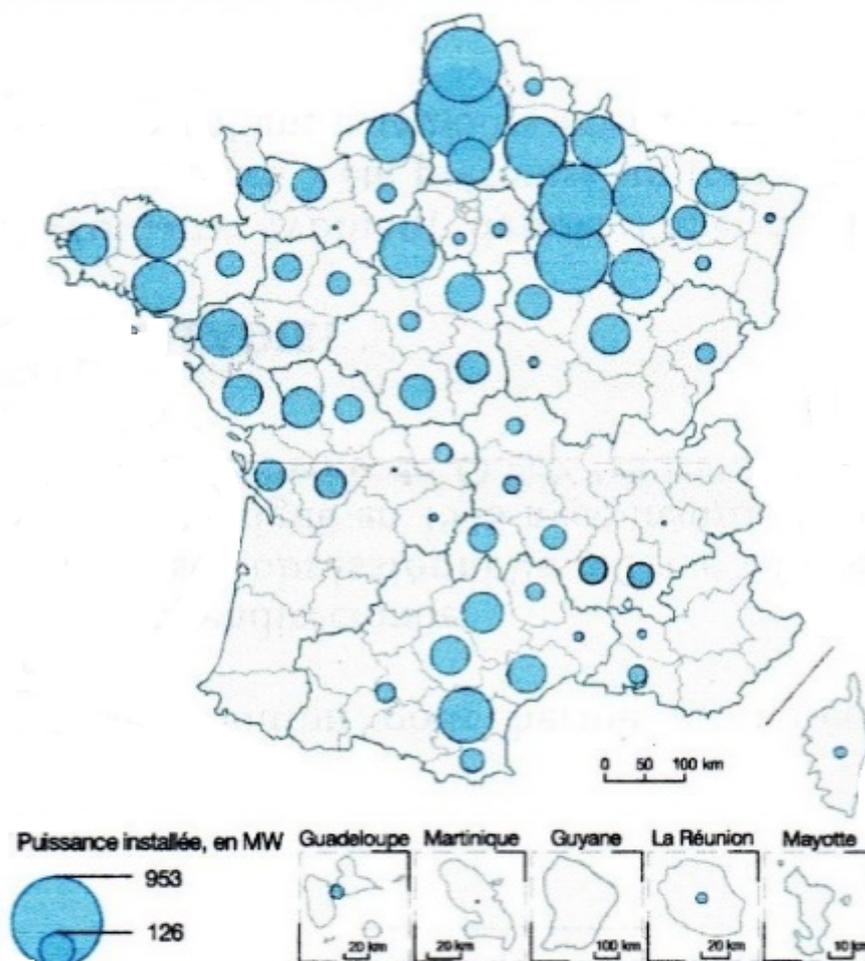
Et en France ?

L'année 2017 marque, pour la deuxième année consécutive, un nouveau record pour la filière éolienne en France avec 1 797 MW raccordés sur l'année. Le dernier trimestre 2017 a été témoin d'une importante progression du parc, avec 687 MW raccordés. Pour rappel, en 2016, 1 437 MW avaient été raccordés.

Par ailleurs, la première session de l'appel d'offres éolien terrestre, d'un volume de 500 MW, a été clôturée le 1er décembre 2017. L'ensemble de l'appel d'offres éolien terrestre porte sur un volume de 3 000 MW. Cinq nouvelles sessions, de 500 MW chacune, devraient être lancées successivement jusqu'en mai 2020.

L'énergie éolienne a permis de couvrir 5 % de la consommation nationale d'électricité en 2017, en hausse de 0,7 % par rapport à l'année précédente [8].

PUISSANCE DES INSTALLATIONS EOLIENNES PAR DEPARTEMENT FIN 2015



Source : SOeS, d'après raccordements Enedis, RTE, EDF-SEI, CRE et les principales ELD

Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2016 – 31 ■

L'installation des éoliennes fait l'objet néanmoins de forte réticences des populations voisines des installations et au nom de la défense de nos paysages.

2.4. Le solaire photovoltaïque (solaire PV)

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu (comme une « pile solaire »). La source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, qui produisent de l'électricité. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de nombreux panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Toutefois, « comme l'éolien, le photovoltaïque ne fonctionne pas à pleine puissance, mais « en moyenne à 15 % en 2011 à l'échelle du parc raccordé au réseau métropolitain » [9].

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques : à base de silicium principalement, de CdTe (tellure de Cadmium) et autres, des modules solaires monocristallins, poly cristallins, amorphes, à concentration, pour lesquelles les rendements, la surface utilisée et les coûts sont différents.

Les coûts sont en baisse, avec des fabrications à gros volume en Chine.

Le monde est encore assez peu équipé en Solaire PV, même dans les pays à fort ensoleillement, ce qui est paradoxal (mais il est vrai les pays du Sud qui sont plus ensoleillés, ne bénéficient les plus souvent pas d'autant de financement en subvention que les pays du Nord).

La Chine, l'Inde, et l'Asie-Océanie sont leaders de l'énergie solaire PV (voir carte ci-après).



L'Europe est relativement avancée en matière d'énergie solaire photovoltaïque, avec une mention spéciale pour le Royaume-Uni et pour l'Allemagne, malgré leur peu d'ensoleillement. Mais il demeure toujours la nécessité d'une énergie électrique d'appoint, compensant l'intermittence de l'énergie solaire quotidienne.

Et en France ? [10]

En 2017, l'électricité produite par la filière solaire (PV + Thermique) atteint un nouveau record avec près de 9,2 TWh produits, en un an, soit une augmentation de 9,2 % par rapport à l'année précédente.

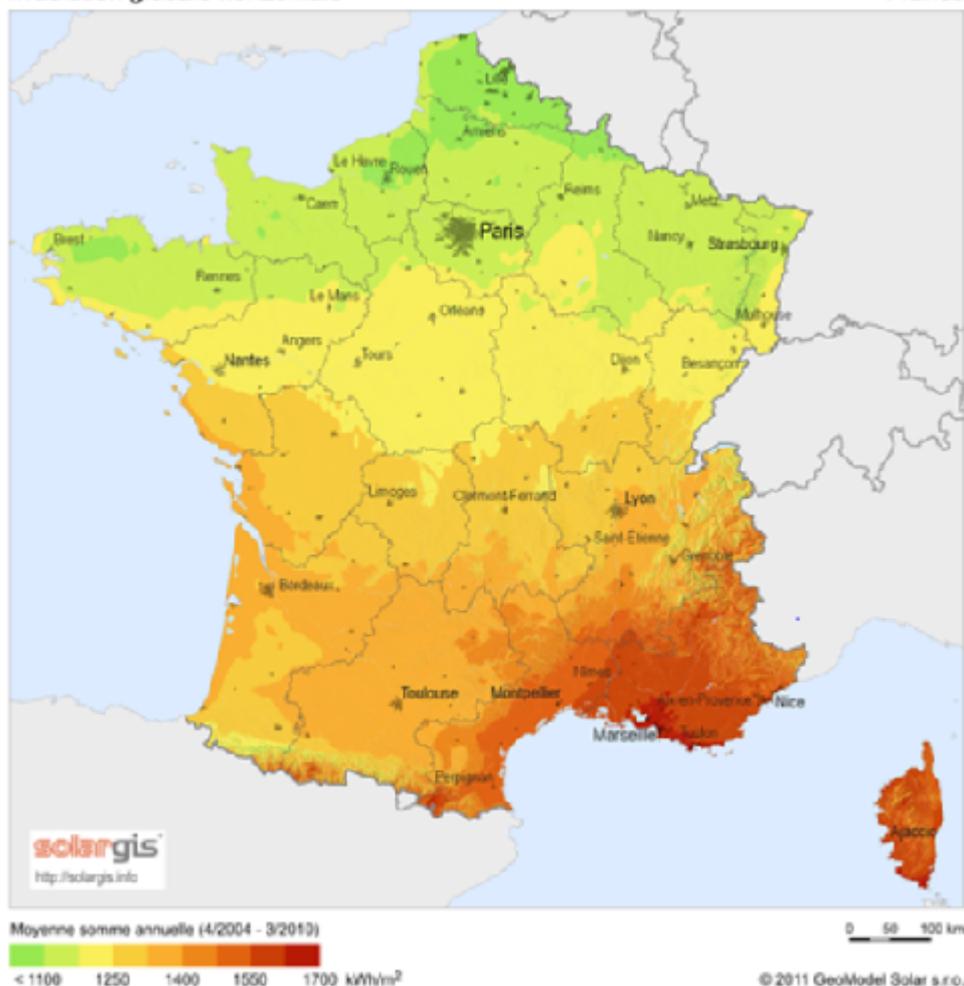
La région Nouvelle-Aquitaine est la plus productrice, avec 2,5 TWh, précédant l'Occitanie et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (respectivement 2,1 TWh et 1,5 TWh).

2.5. L'énergie solaire thermique

L'**énergie solaire thermique** désigne l'**énergie** récupérée à partir des rayons du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux. La chaleur concentrée par les panneaux est transférée à un fluide caloporteur.

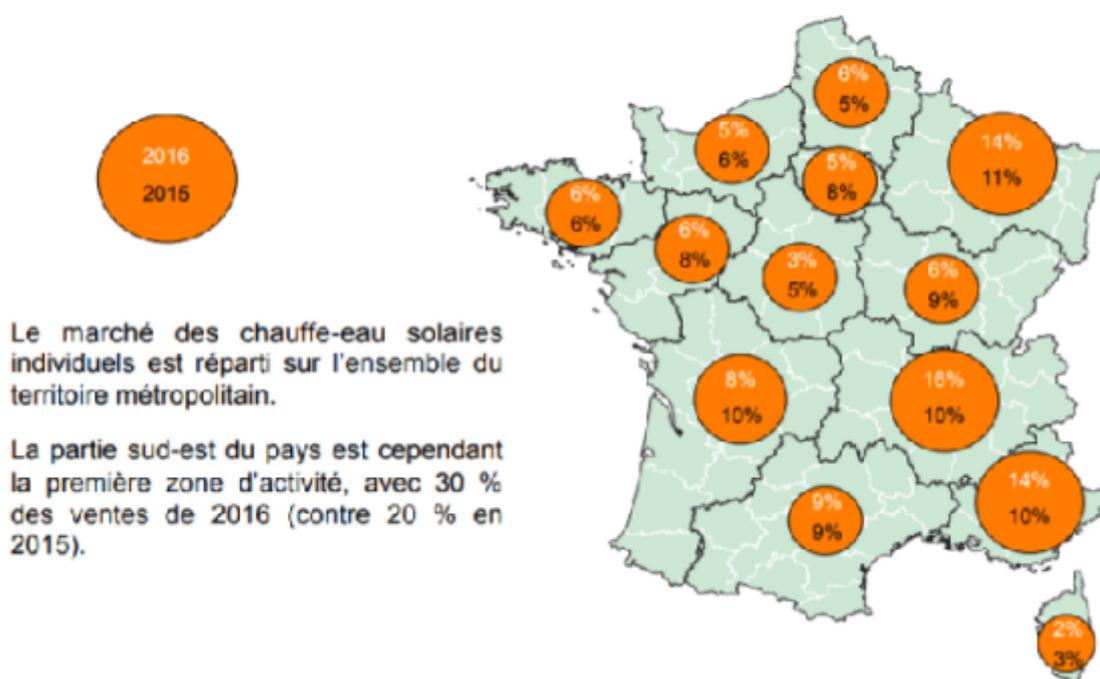
L'Agence Internationale de l'Energie (IEA : www.iea.org), prévoit que, vers 2040, la majorité de la génération des énergies basées sur le renouvelable, seront compétitives sans subvention.

Et en France ? [11]



En 2015, la production de la filière solaire thermique s'élève à 159 kTep (+ 2,4 % par rapport à 2014). Particulièrement développée dans les DOM, notamment à la Réunion, la filière y représente 72 % de la chaleur renouvelable consommée contre moins de 1 % en métropole. Les DOM représentent 30 % des surfaces installées au cours de l'année 2015. Il s'agit essentiellement d'installations chauffe-eau dans des maisons individuelles (CESI, 94 % du total des installations dans les DOM). Le solaire thermique pour l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) a rencontré un grand succès dans beaucoup de pays méditerranéens (Espagne, mais aussi Grèce, Turquie,...) est développé dans les pays méditerranéens à soleil « dur » mais n'a pas encore bien réussi en France. Malgré les efforts de l'ADEME et des subventions, il n'y a pas assez de marché, les autres modes d'ECS (électricité, gaz, butane), sont plus simples et moins chers, et manque de professionnels bien formés, en installation et maintenance.

Cartographie du marché 2016 des CESI



2.6. L'énergie solaire à concentration (ou thermodynamique)

Une centrale solaire thermodynamique à concentration, (en anglais CSP pour *Concentrating Solar Power*) concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur (sels fondus en général) ce qui permet de produire de l'électricité dans un turboalternateur. Ce type de centrale permet, en stockant ce fluide chaud dans un réservoir, de prolonger le fonctionnement de la centrale plusieurs heures au-delà du coucher du soleil. Le CSP est approprié aux zones arides ou désertiques où le soleil est très ardent.

Cependant le coût du CSP s'avère aujourd'hui supérieur à celui du solaire PV, qui a plus baissé en coût.

En Europe, la situation est assez précaire : l'Espagne, qui avait fondé de grands espoirs sur la technologie CSP, a vu la société Abengoa au bord de la faillite. En France, les espoirs mis dans les années 1980 dans la centrale Thémis, (à Targassonne, près de Font-Romeu) se sont dissipés actuellement et aucun projet ne semble en mesure de relayer la centrale Thémis.

La centrale solaire Noor près de Ouarzazate au Maroc a une puissance installée de 160 MW (miroirs cylindro-paraboliques pour Noor 1, 200 MW (miroirs cylindro-paraboliques) pour Noor II (avec un stockage de 8 heures) et 150 MW pour Noor III (thermo-solaire avec tour). La source froide est fournie par le barrage de Mansour Eddhabi. Noor IV sera photovoltaïque et portera la puissance à 580 MW.



Située en Californie (ci-dessous), la centrale solaire thermodynamique d'Ivanpah a, avec ses 173 500 miroirs d' une puissance de 392 MW (© BrightSource).



2.7. La géothermie (en général et en France)

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sous-sol, pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité (cogénération).

Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre.

On distingue la géothermie Haute énergie (la ressource la plus chaude propice à la production d'électricité, moyenne énergie, pour le chauffage par de réseaux de chaleur, et Basse énergie, avec des pompes à chaleur.

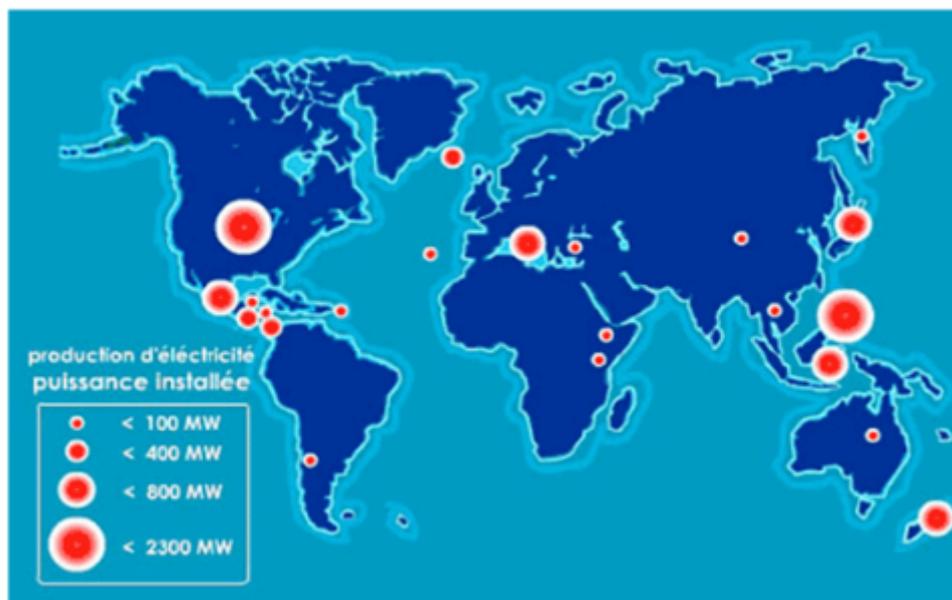
Dans le monde :

La diapositive ci-dessous montre la tendance marquée de la géothermie à s'implanter dans les

régions volcaniques du globe (Caraïbes, Pacifique, Amérique du Nord et du Sud, etc. mais on peut voir aussi qu'elle est encore loin d'avoir fait le plein de ses potentialités.

C'est la température de la ressource qui est le facteur principal pour la production d'électricité, et qui est surtout dans des zones volcaniques.

Électricité géothermique



Source :

La géothermie, a fait l'objet de plusieurs articles de Jacques Varet publié dans notre encyclopédie (voir bibliographie) dont voici un extrait :

« L'Afrique de l'Est est une des rares régions du monde, avec l'Islande, où les mécanismes telluriques affectant la planète amènent le manteau terrestre (à une température de 1300°C) à remonter à faible profondeur du fait de la dynamique des plaques. De ce phénomène d'extension résulte un flux de chaleur qui peut être jusqu'à dix fois supérieur à la moyenne terrestre : il peut atteindre de l'ordre de 1 MW par km². En conséquence, des températures de 250° C peuvent être atteintes à 1500 ou 2000m de profondeur. De ce fait, une électricité renouvelable peut y être produite par forages exploitant de la vapeur directement envoyée en turbine. De très nombreux sites favorables à de tels développements ont été identifiés tout le long de la vallée du rift, depuis l'Erythrée au nord jusqu'à la Tanzanie au sud, et le Kenya a pris le leadership de ce développement avec plusieurs centaines de MWe installés sur le site d'Olkaria et l'objectif d'atteindre 4 000 Mwe en 2030 ».

La géothermie en France ?

L'énergie géothermique exploitée en France est principalement utilisée sous forme de chaleur (105 ktep), produite en métropole, notamment en Île-de-France et en Aquitaine, dans des aquifères profonds de 1500 à 1700m ; Dogger, Trias...

La production d'électricité issue de la géothermie haute énergie (7 ktep) se situe en Guadeloupe (Centrale de Bouillante) et en Alsace (le site de Soultz sous Forêts).

La production d'eau chaude consomme beaucoup d'énergie, de ce point de vue la géothermie est un « plus » à mieux utiliser.

2.8. L'énergie des pompes à chaleur en général et en France

La pompe à chaleur, comment ça fonctionne ?

La pompe à chaleur (ou PAC) est un équipement de chauffage thermodynamique, classé dans les énergies renouvelables. Elle prélève des calories dans une source renouvelable, telle que l'air extérieur, l'eau (de nappe ou de mer), la terre, pour la transférer à plus haute température vers un autre milieu (un bâtiment, un local, un logement...) La PAC est une technologie devenue incontournable avec une marge de progression technique et de diffusion importante : elle permet l'exploitation de différents gisements d'énergie renouvelable grâce à ses nombreuses déclinaisons.

Pour faire fonctionner la « pompe », une source d'énergie externe est nécessaire. Aussi les PAC consomment-elles de l'électricité ou du gaz, mais produisent nettement plus d'énergie thermique que l'énergie mécanique ou électrique consommée, avec un « coefficient de performance » ou COP supérieur à 1. Selon la technologie, et les écarts de température, le « coefficient de performance » de la PAC est plus ou moins élevé. Plus ce coefficient de performance est élevé, plus la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner la pompe sera faible par rapport à la quantité d'énergie renouvelable prélevée au milieu. Ainsi en France, Une pompe à chaleur avec un COP de 3,5 apporte 3,5 unités de chaleur pour chaque unité d'énergie consommée (exemple : 1 kWh consommé produit 3,5 kWh d'énergie thermique). Sur ces 3,5 unités, 2,5 sont extraites de la source froide (chaleur puisée par les capteurs implantés en extérieur) et 1 est l'énergie de fonctionnement de l'appareil. [12]

Ainsi en France, la consommation de chaleur renouvelable est égale à la chaleur totale produite moins la consommation d'électricité de la pompe à chaleur et atteignait en 2015 2 Mtep corrigée des variations climatiques.

L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) indique, dans son scénario, actualisé en 2017, pour 2035 et au-delà, que les PAC pourraient assurer en 2035 34 % des EnR utilisées en-direct dans le résidentiel . [13]

2.9. Les énergies marines renouvelables

Les Océans, qui occupent les trois-quarts de la planète Terre, offrent un potentiel d'énergie gigantesque : vents marins, marées, courants, énergie thermique des mers, vagues, énergie osmotique... et cette énergie fait rêver, mais n'est pas encore domestiquée.

Deux grands auteurs français du XIX^{ème} siècle annoncent les **Energies Marines**

Victor Hugo dans '*Quatre-vingt-treize*', publié en 1874

« Utilisez la nature, cette immense auxiliaire dédaignée. ...

... Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées.

Qu'est-ce que l'océan ? Une énorme force perdue.

Comme la terre est bête ! Ne pas employer l'océan ! »

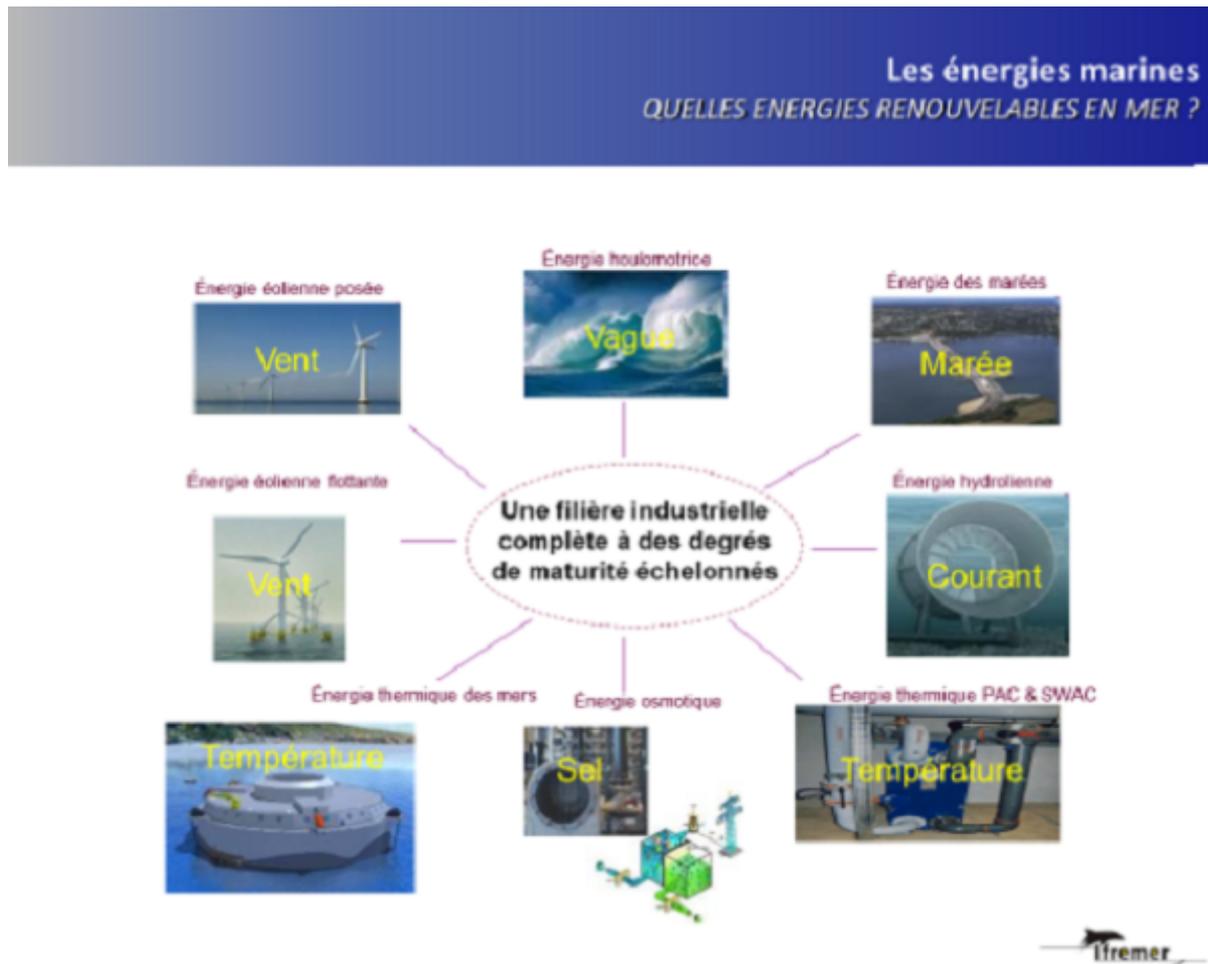
Victor Hugo. (www.victor-hugo.info)

Jules Verne dans '*20000 Lieues sous les Mers*', publié en 1869

« ...J'aurais pu, en effet, en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir de l'électricité par la diversité des températures qu'ils éprouvaient ... »

Jules Verne. (www.clubdesargonauts.org/energie/t...)

La diapo ci-dessous (source Ifremer) présente les différentes énergies marines renouvelables



Les technologies marines : quelques définitions

Les différentes technologies marines de production d'énergie (éoliennes, hydroliennes, houlomotrices, énergie thermique des mers, énergie osmotique ...) sont prometteuses mais ne sont pas toutes arrivées à égale maturité, et aujourd'hui aucune n'est encore déployée à grande échelle.

On distingue les principaux types d'énergies marines suivantes : l'énergie des vagues, celle de la marée, l'énergie hydrolienne (issue des courants), l'énergie thermique des mers, l'énergie éolienne flottante, et osmotique. Les énergies marines renouvelables « proprement dites » sont ainsi au nombre de six : [14]

a) L'Énergie marémotrice : Elle résulte de l'exploitation de l'énergie potentielle de la marée en utilisant les différences de niveau entre haute et basse mer. On la capte en utilisant les variations du niveau de la mer, en remplissant, puis en vidant des réservoirs par l'intermédiaire de turbines. Le phénomène de marée est dû à l'action gravitationnelle combinée de la lune et du soleil et des frottements sur le fond des océans. Les variations périodiques du niveau de la mer sous l'effet de la marée sont donc particulièrement prédictibles. En France, l'usine marémotrice de La Rance fonctionne depuis 1964, et en Corée du Sud, Lake Shiwa depuis 2011. D'autres sites possibles, dans des estuaires, se heurtent à des oppositions environnementales.

b) L'Énergie hydrolienne (ou hydro cinétique) : utilise l'énergie cinétique des courants marins issus des marées qui vont actionner des turbines hydroliennes, généralement sous-marines ; il y a aussi des hydroliennes avec une partie flottante. Cette énergie fluctue à l'échelle journalière comme pour les marées, sauf pour les hydroliennes fluviales.

c) L'Éolien offshore « flottant » : produit de l'énergie au moyen de turbines solidaires d'un support flottant à la surface de l'océan. Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis grâce à un aérogénérateur en énergie électrique.

d) L'énergie des vagues et de la houle (houlomotrice) : récupère l'énergie mécanique des vagues et de la houle formée par l'effet du vent soufflant sur la surface de l'océan. Il y a de nombreux dispositifs, comme un système de poids oscillant avec le phénomène de houle, ou remplissant puis vidant alternativement des pompes hydrauliques, ou utilisant une colonne d'eau oscillante ou un courant d'air produit par les vagues, ce qui a pour effet final de charger des accumulateurs à haute pression et d'entraîner des générateurs d'électricité. Cette filière est fortement marquée par les effets saisonniers, et est malheureusement sensible aux tempêtes souvent assez destructrices.

e) L'énergie thermique des mers - ETM : exploite la différence de température entre les eaux superficielles chaudes des océans, principalement dans les zones tropicales et les eaux profondes, beaucoup plus froides : les usines se composent d'un ensemble évaporateur-turbine-condenseur et de conduites et de pompes d'alimentation pour récupérer et acheminer les eaux froides des profondeurs et les eaux chaudes de la surface.

Les **SWAC** (*Sea Water Air Conditioning*), utilisent l'eau froide profonde de la mer pour le conditionnement d'air en zone climatique chaude, ont aussi un grand potentiel en permettant l'effacement de consommation d'électricité par substitution.

f) L'énergie osmotique : vient du potentiel physico-chimique produit par la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce. Lorsque deux masses d'eau de concentration en sel différentes sont en contact, les molécules d'eau douce ont naturellement tendance à passer du compartiment le moins condensé, vers le plus condensé, pour rétablir l'équilibre de concentration. C'est le phénomène de la pression osmotique, dont le principe est simple et connu utilisé en « osmose inverse » pour le dessalement de l'eau de mer, qui requiert des membranes élaborées, utilisables à grande échelle dans les estuaires.

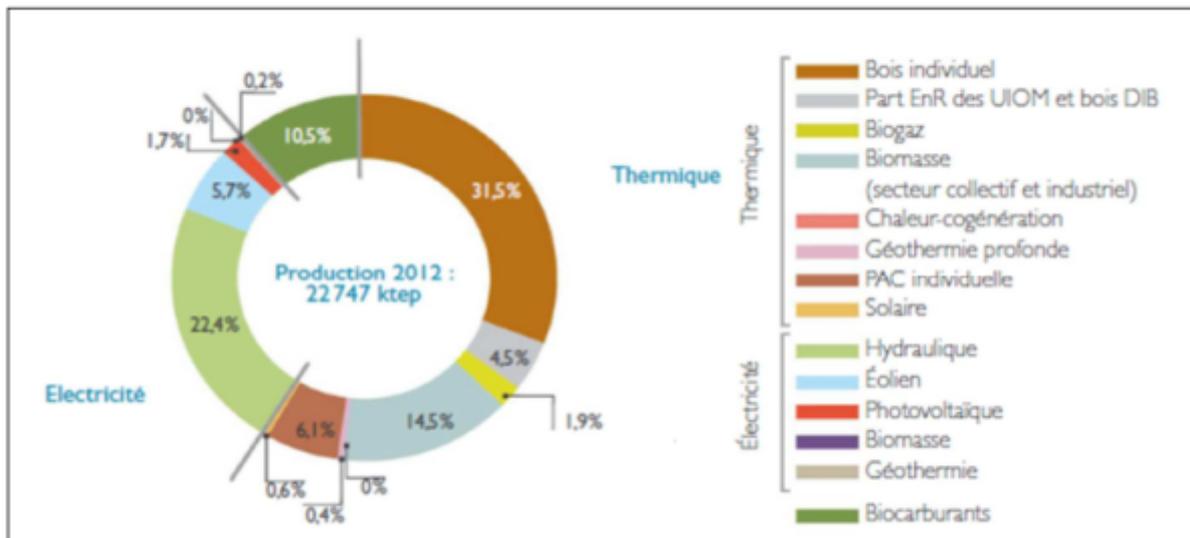
D'autres énergies, non pas issues de la force de la mer, mais disponibles « en mer », doivent être également mentionnées : La biomasse marine (culture et/ou exploitation des micro-algues) L'éolien offshore « posé », c'est-à-dire fixe par rapport au fond de l'océan.

3 - La situation des énergies renouvelables en France .

Pour situer la France dans les comparaisons entre pays en énergies renouvelables, il faut rappeler que le mix électrique français est l'un des moins carbonés au monde, en raison des parts d'énergie nucléaire (72 % en 2015) et d'hydro-électricité (12 % en 2016).

« L'Union européenne a décidé, dans son nouveau Paquet Énergie-Climat 2030, d'atteindre 27 % d'énergies renouvelables dans son bouquet énergétique. La France a, quant à elle, inscrit dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte l'objectif de porter la part des énergies renouvelables dans sa consommation brute à 32 % en 2030.

Graphique n° 1 : répartition de la production française d'EnR électriques et thermiques

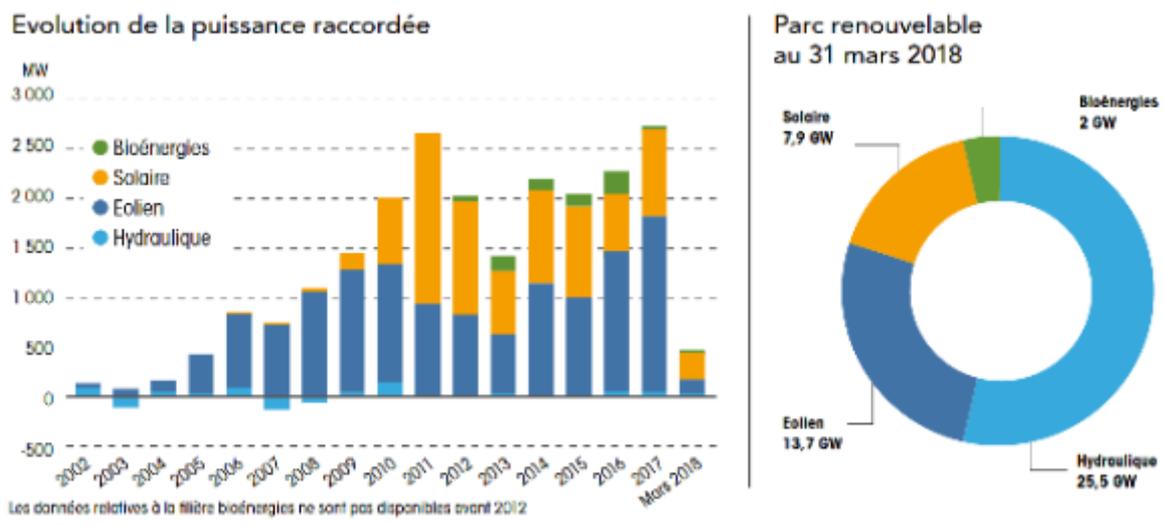


Source : Ademe, 2012 (Les chiffres actualisés pour 2015 figurent en annexe n° 7)

Quel est le poids des EnR en France : Le compte rendu annuel du Service de l'observation et des statistiques du Commissariat Général du Développement durable (CGDD), indique que les EnR représentent 9,4 % de la consommation d'énergie primaire et 14,9 % de la consommation finale brute d'énergie en France en 2015, en estimation provisoire. Ces parts sont en progression régulière depuis une dizaine d'années. La croissance importante des énergies renouvelables depuis 2005 (+ 48 %) est principalement due à l'essor des **biocarburants**, des **pompes à chaleur** et de la **filière éolienne**.

Les différentes EnR en France se répartissent en une dizaine de filières développées à plus ou moins grande échelle selon les régions. La production de filières peut varier fortement sans possibilité de contrôle, du fait de la pluviométrie, de l'ensoleillement et du vent. Le climat a en outre un impact important sur la consommation d'énergie, en particulier sur celle de biomasse, principalement utilisée pour le chauffage.

Au vu du bilan présenté en mars 2018 par ENEDIS, le SER et l'ADEeF, 23 % de la consommation électrique en France provient des ENR



Source : Panorama ENR 2018 /syndicats énergie renouvelables

Quelle est la place de la France, en matière d'EnR, en Europe et dans le monde ? En classant les 28 pays de l'Union européenne selon la part de leur consommation finale brute d'énergie, produite à partir de sources d'énergie renouvelable, la France occupe la **seizième** position en 2014. En niveau absolu de production, la France est leader pour l'hydroélectricité, deuxième pour la biomasse solide, les déchets et les biocarburants, quatrième pour l'éolien et le solaire photovoltaïque. A l'échelle mondiale, la Chine reste le premier producteur d'énergies renouvelables dans le monde en 2014, suivie de l'Inde puis de l'Union européenne.

Il faut mobiliser la biomasse, où la France, avec ses forêts, est plutôt bien placée en Europe (et sans doute dans le monde, qui ferait bien de l'imiter, au lieu de « déforester » au maximum, comme c'est malheureusement le cas aujourd'hui).

En conclusion

Des conditions de développement liées aux spécificités nationales et locales

Vis-à-vis des stratégies de lutte contre les changements climatiques, la France présente un profil particulier compte-tenu de la place prise par la production d'électricité d'origine nucléaire largement dominante qui n'est pas productrice de GES. Le développement des EnR électriques en France est appelé pour partie à se substituer à une part de l'énergie nucléaire sans faire appel à des énergies carbonées à court terme. Une forte réduction des GES passe par une substitution des énergies carbonées pour lesquelles les EnR thermiques serait une voie à développer. On ne peut sur ce point que s'étonner du relatif développement des EnR thermiques en France.

Un affranchissement de notre dépendance énergétique au nucléaire oblige à la diversification de nos sources d'énergie.

Les EnR peuvent constituer des moyens de production très décentralisés s'adaptant à des contextes géographiques très variés : beaucoup y voient une voie de revitalisation de territoires subissant de lourds handicaps (montagnes, forêts, territoires ruraux, etc.) et de prise en charge par les acteurs locaux de nouveaux leviers de développement.

Un affranchissement de notre dépendance énergétique au nucléaire plaident pour la diversification de nos sources d'énergie.

Les difficultés rencontrées par l'Allemagne

L'exemple de l'Allemagne [15] est intéressant, dans la mesure où celle-ci se présente comme un modèle de transition énergétique (*Energiewende*) : depuis 2012, l'Association *Climate Action Network Europe* (Greenpeace, WWF, etc.), publie un indice mesurant les efforts des différentes nations concernant la lutte contre le réchauffement climatique : l'« Indice de Performance Climatique ». L'indice 2017 décrit une Allemagne qui dégringole de sept places. L'hebdomadaire « *Die Zeit* » constate : « L'Inde fait mieux que nous », et le *Frankfurter Allgemeine Zeitung* ajoute : nous sommes « derrière l'Egypte et l'Indonésie ». Le secteur énergétique allemand après plus de dix ans d'*Energiewende* [16] émet autant de gaz à effet de serre pour une consommation donnée en 2016 qu'en 2005.

Le « virage énergétique » allemand se caractérise par une focalisation sur l'électricité, par l'expansion privilégiée du solaire et l'éolien, et par une volonté d'une production décentralisée, dont le nucléaire est le contraire absolu. Mais l'Allemagne est à la traîne dans la lutte contre le réchauffement climatique, avec son accroissement des émissions de CO₂, dues à l'usage des centrales à charbon et au lignite national. De ce point de vue-là, elle n'est pas un modèle.

Toutefois ces avancées entraînent, malheureusement, un recours accru au charbon et au lignite (surtout en Allemagne), ce qui, on l'a vu, fait grimper actuellement l'émission des gaz à effet de serre dans ce pays qui n'apparaît donc plus comme un modèle de transition énergétique.

La question du coût des ENR

Aux plans économique et financier, les EnR en général, (éolien et solaire), sont encore coûteuses en temps et en argent, mis à part l'hydro-électricité qui suscite, en France, pour les nouveaux projets des oppositions « sociales », la géothermie, qui n'en suscite guère mais reste marginale, et les pompes à chaleur qui ont sans doute un grand avenir devant elles.

La **Cour des Comptes** dans son rapport publié en mars 2018 met en avant un certain nombre de difficultés financières qui font obstacle au développement des EnR en France aujourd'hui .

- Les dépenses publiques de soutien au développement des ENR représentent des sommes importantes au regard des quantités d'énergie produite particulièrement pour l'éolien et le photovoltaïque, dépenses qui sont appelées à croître (1.5Md€ en 2011, 4,4 Md en 2016, 97 à 10,4 Md en 2023).
- Les EnR électriques bénéficient de l'essentiel de ces dépenses, avec 4,4Md en 2026 contre 567 M € pour les ENR thermiques. Ainsi les ENR thermiques reçoivent le dixième du volume des soutiens publics alors qu'elles représentent 60% de la production nationale.
- Compte tenu de son profil énergétique peu carboné, si la France avait voulu faire de sa politique en faveur des EnR un levier de lutte contre le réchauffement climatique, elle aurait dû concentrer prioritairement ses efforts sur le secteur des EnR thermiques qui se substituent principalement à des énergies fossiles émissives de CO2. De ce fait, la place consacrée aux énergies renouvelables électriques dans la stratégie française répond à un autre objectif de politique énergétique, consistant à substituer les énergies renouvelables à l'énergie de source nucléaire.
- Leur volume a progressé de 9,2 % dans la consommation finale d'énergie en 2005 à 15.7 % fin 2016, soit une progression notable mais en décalage par rapport aux objectifs affichés.
- Faute de stratégie claire le tissu industriel français a peu profité du développement des ENR. Contrairement à d'autres pays européens, la France n'est pas parvenue à se doter de champions dans ce secteur.

L'Allemagne est considérée comme en avance en matière d'énergies renouvelables, pour l'éolien, le solaire et la méthanation, du fait d'une volonté politique ancienne, et d'un consensus national, qui a permis le développement d'une industrie des EnR nationales. Cela a un prix : le prix de l'électricité pour les ménages est aujourd'hui en Allemagne près du double du prix Français, alors que la somme des soutiens publics des EnR (hors bio-carburants) reste sensiblement plus élevée en Allemagne (23MD en 2016) qu'en France (5.3MD€) - source : Rapport Cour des Comptes 2018.

Les questions qui se posent sont donc : Comment financer les EnR ? Qui paie quoi ? Si on subventionne, comment ? Tarifs d'achats systématiques en « *feed-in tariffs* », ou appels d'offres, ou programmes ciblés d'aide à la R&D ?

En France, le développement des EnR est largement pris en compte par la CSPE (Contribution au Service Public de l'électricité) qui s'applique aux factures des consommateurs d'électricité.

Un immense potentiel mais encore beaucoup d'obstacles.

Les critiques de la Cour des Comptes reposent, pour l'essentiel, sur des considérations financières actuelles et ne donnent qu'un point de vue partiel des critères pouvant plaider pour ou contre un développement des EnR.

Dans une perspective de plus long terme, et conjugué aux efforts de maîtrise de l'énergie, le potentiel des énergies renouvelables est immense. Aujourd'hui ce potentiel n'est pas encore techniquement et économiquement totalement exploitable. Les besoins en R&D sont importants : technologie de production et mode de gestion d'énergies intermittentes.

Outre les problèmes de coût, il y a encore beaucoup d'obstacles à surmonter :

- En éolien offshore, PV, CSP, hydroélectricité,
- Impacts sur les réseaux électriques,
- Gestion d'une ressource intermittente,
- Environnement : CO2, émissions polluantes, faune, flore, eau, paysage et acceptabilité sociale...
- Mobilisation de la ressource en biomasse,
- Compatibilité avec la réduction de consommation...

On peut résumer les perspectives de développement comme suit :

- **À court terme** : solaire et géothermie pour les usages thermiques, éolien pour la production d'électricité, hydroélectricité, biocarburants dérivés de l'agriculture alimentaire dans les transports, biomasse, etc. ;
- **À moyen / long terme** : biocarburants ligno-cellulosiques, production d'électricité par éolien en mer, autres énergies marines, géothermie profonde.

Cet article, centré sur la place actuelle et le devenir des EnR, n'est qu'un élément de réflexions sur les stratégies énergétiques, qu'il s'agisse de considérations relatives à la production d'énergie ou de ses usages. En particulier, la recherche des EnR n'empêche pas de rechercher, aussi et d'abord, toutes les économies d'énergie, par de nouveaux modes de vie ou l'amélioration de notre patrimoine comme l'**isolation des logements existants**, qui sont majoritaires dans le parc de logements actuel et dont le coût peut être amorti en quelques années.

Il faudra du temps pour que les ENR prennent toute la place qui leur revient : avec baisse des coûts, offre professionnelle à construire et réglementation à adapter.

°O°

Notes

[1] AIE : www.eia.org

[2] Chiffres donnés pour 2005 par le site du *Guardian* (UK)

[3] Chiffres donnés pour 2012 par la Newsletter Géopolitique de l'électricité n° 45, parue en octobre 2014.

[4] OMV : *Oesterreichische Ölverwaltung* : société fondée en 1956 et ayant son siège social à Vienne (Autriche).

[5] AIE : Agence Internationale de l'énergie, OCDE : Organisation de coopération et de développement économique (20 pays fondateurs en 1960 : USA + Canada + 18 pays d'Europe)

[6] Mtep : mégatep, unité d'énergie équivalente à un million de tonnes de pétrole.

[7] Carte donnée par le CGDD (SOeS) (voir le site du ministère de la Transition énergétique et solidaire)

[8] Chiffres 2017 donnés par RTE
(<http://www.rte-france.com/fr/article/panorama-de-l-electricite-renouvelable>)

[9] Argument cité en première ligne par la Brochure du Syndicat des EnR, (brochure imprimée en mars 2013)

[10] Chiffres 2017 donnés par RTE :
http://www.rte-france.com/sites/default/files/panorama_enr_2017.pdf

[11] Chiffres donnés par le CGDD (Soes) (ministère de la transition écologique et solidaire - MTES)

[12] SOeS, d'après *Pac&Clim'Info*, *Observ'ER* et *Ceren*. La consommation de chaleur renouvelable atteignait en France en 2015, 2 Mtep, corrigées des variations climatiques.

[13] p. 8 du scénario actualisé 2035 et au-delà (document Ademe).

[14] France Energies Marines est l'Institut pour la Transition énergétique dédié aux énergies marines renouvelables. <http://www.france-energies-marines.org>

[15] Chiffres donnés en 2017 par la Newsletter *Géopolitique de l'électricité* n°72, parue en février 2017.

[16] *Energiewende* : virage énergétique (traduction libre des rédacteurs)

Bibliographie

* Chiffres-clés des énergies renouvelables (EnR) -février 2017 par le service statistique du ministère de la Transition Ecologique (Commissariat général au développement durable) édition 2016 »,

* Inspection Générale des Finances, CGEIET, CGEDD :

- Rapport sur « *les Energies renouvelables électriques : coûts, services rendus, soutien et régulation* » Juin 2014 -
- « *L'Incidence sur la santé humaine des différentes sources de production d'énergie électrique : évaluation sur les cinquante dernières années* », 13 juin 2017

<https://www.academie-technologies.f...>

* Rapport de la Cour des Comptes au Sénat sur « *Le soutien aux énergies renouvelables* » mars 2018.

* Séance de l'Académie d'Agriculture « *Le bois énergie : Eldorado ou illusion* », 6 juin 2018

* Jean Boyé : Article pour la promotion du solaire comme source d'énergie décentralisée en Afrique ;

Revue 'Liaison' *Energie - Francophonie* éditée par l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable , numéro 107 -2ème trimestre 2018

* Réseau Action Climat (RAC) France : - Dossier de presse 14 Juin 2018 : dernière note du RAC sur notre PPE

Lire également dans l'encyclopédie

dans l'Encyclopédie :

* Laurent Meunier, Eric Vidalenc : [*Scénarios énergétiques ADEME 2030-2050 pour la France*](#), N° (208) , juin 2014.

* Jacques Varet : [*La géothermie pour la production d'électricité*](#), N° (155) , janvier 2012.

* Michael Klare : [*Le troisième âge du carbone*](#), N° (220), juin 2015.

* Benjamin Dessus : [*La situation énergétique de le France -Etat des lieux -*](#), N° (195/196), juin 2013.

* Marie Chéron, Liliane Duport, Pierre Grison : [*La transition énergétique : révolution économique et défi démocratique Le développement durable en région Rhône-Alpes*](#), N° (169), octobre 2012.

* Jacques Varet : [*La géothermie Aspects généraux*](#), N° (143), juin 2011.

* Jacques Varet : [*le pétrole et les ressources énergétiques fossiles : Le type même de développement non durable*](#), N° (44), mai 2007.

* Benjamin Dessus : [*Introduction à l'énergie*](#), N° (24), janvier 2007.

Sur Internet

- AIE : www.eia.org

- RTE : <http://www.rte-france.com/>

- France Energies Marines : <http://www.france-energies-marines>