

## LES ENERGIES RENOUVELABLES

### Sommaire

1. Généralités
2. Les énergies géothermiques
3. L'énergie hydraulique
4. L'énergie éolienne
5. L'énergie solaire thermique
6. L'énergie solaire photovoltaïque
7. L'énergie issue de la biomasse
8. Conclusion

### 1. Généralités

Les énergies renouvelables, EnR, sont les énergies qui, après avoir été prélevées dans la nature, sont à nouveau disponibles dans un temps suffisamment court pour, à notre échelle de temps, être considérées comme inépuisables. En cela, elles diffèrent des énergies fossiles qui demandent des millions d'années pour se constituer et sont utilisées en un temps infiniment court à l'échelle de celui nécessaire à leur reconstitution. Suivant leur origine, les énergies renouvelables se classent en trois domaines :

- Les **énergies géothermiques** exploitant la chaleur contenue dans le sous-sol ;
- Les **énergies gravitationnelles** dues à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil, forces qui se manifestent par les marées (forme d'énergie potentielle) et certains courants marins (forme d'énergie cinétique appelée énergie hydrolienne), des énergies faisant partie des énergies hydrauliques ;
- Les **énergies solaires** : celles exploitant directement le rayonnement du soleil par les capteurs thermiques et les capteurs photovoltaïques, et celles issues des phénomènes atmosphériques qu'entraîne le soleil, ce sont le vent, les pluies, les vagues et la croissance végétale.

### 2 - Les énergies géothermiques

Ces énergies thermiques, qu'elles soient sources d'eaux chaudes ou de vapeur comme celles de Larderello en Italie, ou celles que l'on trouve en Islande, en Nouvelle Zélande, ou encore en Indonésie, ou qu'elles soient des sources artificielles résultant de forages, sont la conséquence de l'intense chaleur du magma du centre du globe terrestre. Il y a trois types de géothermie :

- La géothermie **peu profonde** à très basse énergie, à des températures inférieures à 50°C ;
- La géothermie **profonde**, jusqu'à 2 000 m, soit à basse énergie, correspondante à des températures de 50 à 100°C soit à moyenne énergie à une température de 100 à 150°C ou à haute énergie dans un contexte volcanique à des températures supérieures à 150°C ;
- La géothermie **très profonde** (de 5 000 m à 10 000 m) à très haute énergie à des températures jusqu'à 300°C.

La géothermie à basse et à très basse énergie est utilisée pour alimenter les réseaux de chaleur de chauffage urbain. Celle à moyenne et haute énergie permet la production d'électricité grâce à des turbines à vapeur et même électricité et chaleur en cogénération.

Les productions d'énergie issues de la géothermie ont la caractéristique d'être contrôlables, réglables et disponibles en continu, elles ne demandent donc pas de mise en œuvre de stockage. Malheureusement, la puissance exploitable au niveau mondial serait seulement de l'ordre de 50 GW, produisant au plus 440 TWh, une quantité infinitésimale en regard de la production mondiale d'énergie de l'ordre de 154.10 TWh. Néanmoins, l'installation de centrales géothermiques aux abords de zones volcaniques est envisageable comme cela a été le cas pour la centrale de Bouillante en Guadeloupe près du volcan de La Soufrière.

*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 à des températures voisines de l'ambiante stockée dans le sol grâce au rayonnement solaire mais pas de la chaleur provenant du magma du centre de la Terre qui alimente les sources naturelles évoquées ci-dessus.*

### **3 – L'énergie hydraulique**

Se regroupe sous cette dénomination d'énergie hydraulique l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marées, vagues. Ce mouvement peut être directement utilisé avec un moulin à eau en tant que source d'énergie mécanique comme cela fut le cas par le passé, ou, comme aujourd'hui, être converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

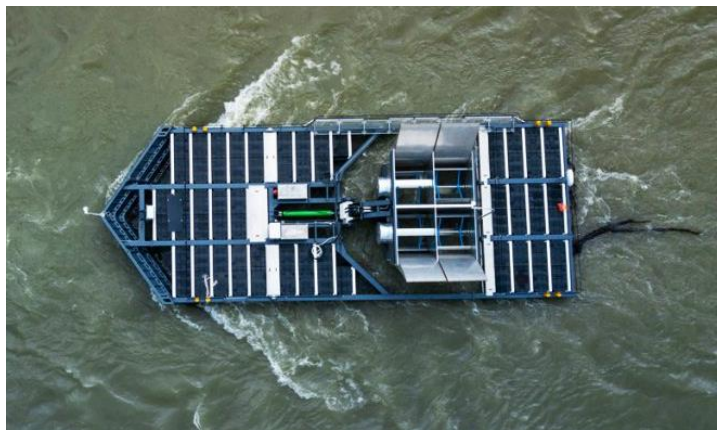
L'énergie hydraulique est soit une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins et les cours d'eau, ou encore le mouvement des marées ou des vagues soit elle est une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

#### **L'énergie des courants marins ou fluviaux : les hydroliennes**

Une hydrolienne est une turbine hydraulique sous-marine ou à flots qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux pour produire de l'énergie mécanique elle-même convertie en électricité. Les tests du projet EDF de l'hydrolienne sous-marine de Paimpol-Bréhat, en Bretagne ont jusque là été suffisamment positifs pour être poursuivis. L'hélice (figure 1) d'un diamètre de 16 m est déposée par 35 m de fond, elle peut engendrer une puissance électrique maximum de 0,5 MWe.



**Figure 1** - L'hydrolienne de Paimpol-Bréhat



**Figure 2** – Hydrolienne fluviale sur le Rhône

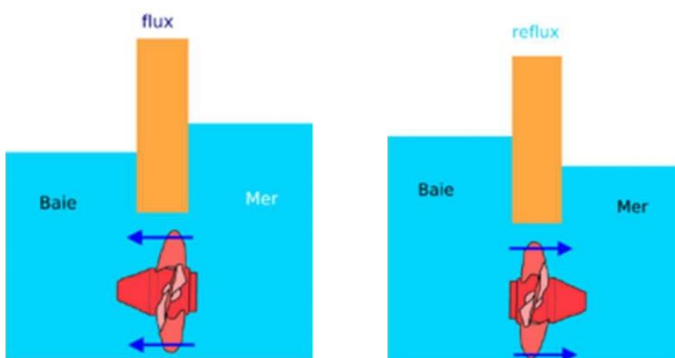
A Bordeaux, en aval des piles du Pont de Pierre, quatre turbines fluviales d'une puissance totale de 80 kW ont été immergées, bien que près de la mer, elles fonctionnent aussi bien au flot qu'au jusant.

Dans le Rhône, en amont de Lyon, ont également été installées 4 hydroliennes fluviales de 80 kWe produisant 1 GWh d'électricité par an.

A noter que la mise en œuvre de cette forme cinétique de l'énergie 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. Le potentiel mondial de l'énergie produite par des hydroliennes actuellement de l'ordre de 100 GW pourrait être en 2050 d'après l'Agence Internationale de l'Énergie, l'AIE, de 750 GW dont 100 GW exploités en Europe.

#### **L'énergie des marées : les centrales marémotrices**

Le principe très simple du fonctionnement d'une installation marémotrice est schématisé figure 3.



**Figure 3** – Principe de fonctionnement d'une centrale marémotrice

L'intérêt de cette énergie est que, cyclée par le rythme des marées, sa disponibilité est prévisible pour gérer l'alimentation du réseau électrique.

Cette forme d'énergie était peu exploitée jusqu'à une période récente : il y avait la centrale marémotrice de la Rance, en France, et celle d'Annapolis Royal au Canada. Aujourd'hui d'autres centrales ont été implantées en Chine, en Russie et en Corée où la centrale Sihwa d'Ansan, près de Séoul, est avec la centrale de la Rance l'une des deux plus grandes usines marémotrices du monde (capacités respectives de 250 et 254 MWe). Bien que l'énergie dissipée dans le monde par cette forme d'énergie soit de l'ordre de 20% de la consommation mondiale d'énergie, le nombre de sites exploitables reste limité car, pour ce faire, il faut une hauteur de marée qui dépasse 10 mètres, ou une vitesse de courant supérieure à 3 nœuds.

### **L'énergie des vagues : énergie houlomotrice**

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

- Elle est plus répartie ;
- Elle stocke de l'énergie éolienne sous forme cinétique ;
- Elle est donc plus prévisible (via la météo) et ainsi plus facile à exploiter.

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.

Cette exploitation d'énergie houlomotrice a déjà atteint une phase de faisabilité dans plusieurs pays, en particulier au Portugal et au Royaume Uni où plusieurs prototypes fonctionnent. Compte tenu de la puissance spécifique de ces capteurs de houle, la puissance opérationnelle se situe dans la gamme de quelques centaines de kW jusqu'à 750 kW dans le cas du module Pelamis installé en Ecosse (figure 4).



**Figure 4** - Prototypage de récupération de l'énergie des vagues (Le Pelamis, Edimbourg)

### **L'énergie potentielle hydraulique : les turbines hydroélectriques**

C'est l'énergie associée aux précipitations pluvieuses ou neigeuses. Elle est disponible sous la forme potentielle : par la retenue d'eau dû au barrage des rivières avec moulins à roue à aubes longtemps utilisés pour scier, pour moudre et pour fouler soit plus actuelles, les retenues d'eau de barrages actionnant des turbines hydroélectriques.

Le barrage et sa retenue d'eau sont assimilables à un mode de stockage d'énergie exploitable sans contrainte particulière. Pratiquement abandonnés pour alimenter le moulin à roue, les barrages alimentent les turbines hydrauliques avec lesquelles est produite la quasi-totalité de l'électricité d'origine hydraulique.

Leur capacité de stockage est également utilisée dans les STEP, stations de transfert d'énergie par pompage. Ce sont des centrales hydro-électriques réversibles ayant deux bassins à des altitudes différentes. Lorsqu'il y a un surplus d'électricité produite, le bassin supérieur est rempli par pompage et en cas de manque vidé par turbinage.

En France, en 2020, avec un parc hydroélectrique installé de 25,7 GW, la production d'électricité a été de 60,8 TWh, un taux de couverture de la consommation de 13,5 % (données RTE).



**Figure 5** - Moulin à eau



**Figure 6** - Barrage hydroélectrique (Vouglang – Jura)

#### 4. L'énergie solaire thermique

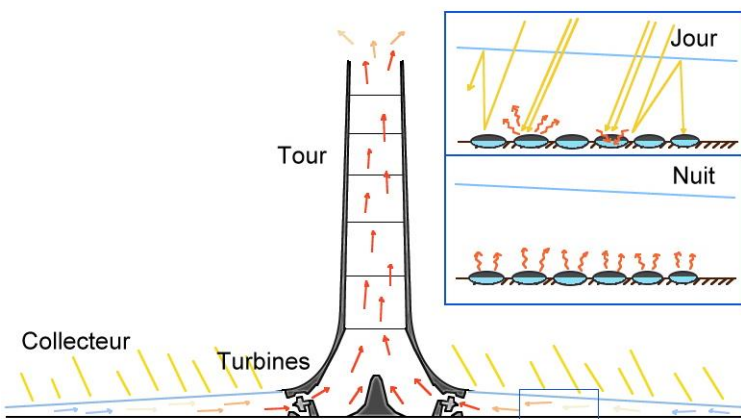
Le rayonnement solaire produit de la chaleur qui s'emmagasine dans le sol ou dans les nappes phréatiques à des températures de 5 à 20 °C. Elle peut être récupérée par des pompes à chaleur pour la production d'eau chaude, le chauffage de l'habitat, celui des piscines ou le séchage des récoltes. Ce rayonnement solaire en fait est surtout exploité par des capteurs exposés directement au soleil qui sont soit plans soit à concentration.

##### Les capteurs plans

Ils absorbent directement la chaleur du 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 : il va de 2 à 3 dizaines de degrés pour les capteurs plans sans couverture (type capteurs de piscine) jusqu'à plus de 100°C pour les capteurs évolués avec vitrage et dépôt absorbant sélectif. Ces calories sont transférées à un liquide, souvent de l'eau, elles peuvent être alors stockées quelques heures grâce à la grande chaleur spécifique de l'eau. Il s'agit, typiquement, de chauffe-eau solaires destinés à l'habitat individuel pour un usage domestique et sanitaire (douche, bain, vaisselle, etc.) voire pour réchauffer l'eau de la piscine.

A plus grande échelle, une installation de capteurs plans fonctionne depuis début 2018 à Châteaubriant en Loire- Atlantique. D'une puissance thermique de 2 MW (2 200 m<sup>2</sup> de panneaux) produisant 900 MWh/an, cette installation est reliée au réseau de chauffage urbain.

Un cas particulier d'application des capteurs plans est la tour solaire à effet de cheminée. Dans ce concept, l'air est chauffé par une surface de captage solaire plane formée d'une couverture transparente et agissant comme une serre. L'air chaud est concentré au bas d'une grande cheminée centrale d'où, étant plus léger, il s'échappe vers le haut par convection naturelle. Cette circulation d'air entraîne des turbines placées à l'entrée basse de la cheminée et qui produisent de l'électricité. Le principal avantage de ce système est qu'il peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur emmagasinée dans le sol la nuit.

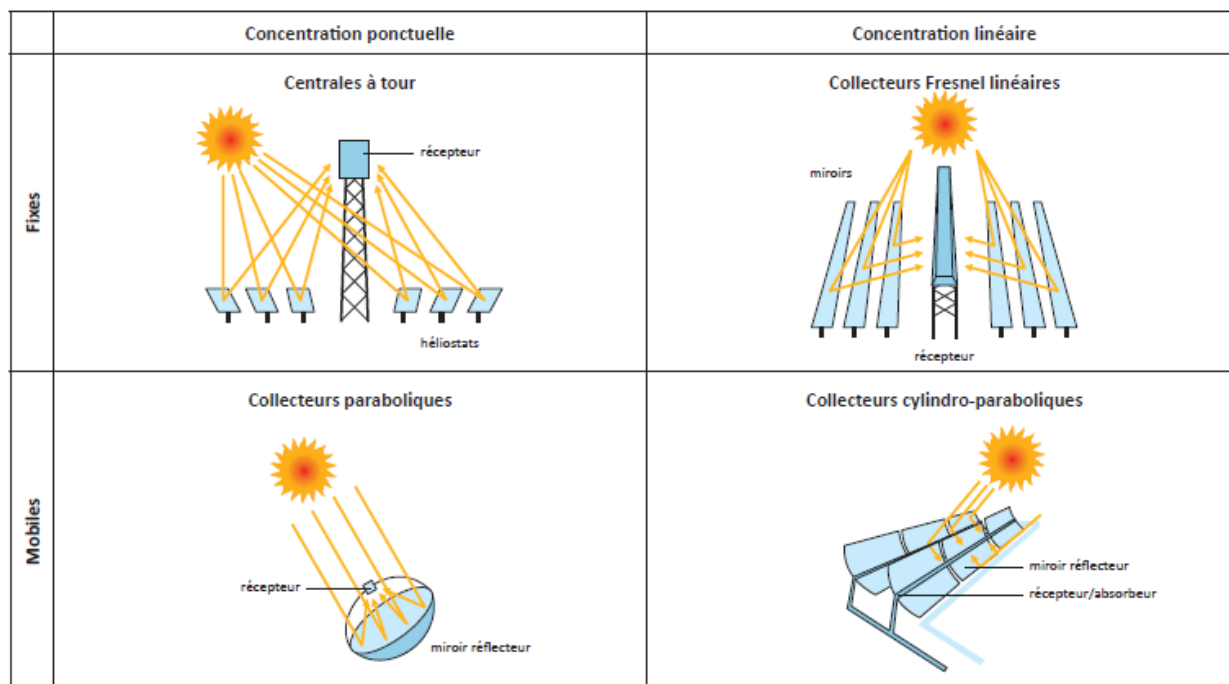


**Figure 7** - Schéma de principe d'une tour solaire

## Les capteurs à concentration

Dans ce cas, le rayonnement est d'abord concentré par un ensemble de réflecteurs sur un élément central où la température atteint plusieurs centaines de degrés. Un absorbeur transmet cette chaleur à un fluide caloporteur (eau, huiles minérales, sels fondus, gaz ...) qui dans la plupart des cas alimente une unité de production d'électricité. Plusieurs systèmes sont possibles: turbines à gaz solarisées, cycle de Rankine vapeur, moteur Stirling, cycle de Rankine organique, etc. Le choix d'un système est conditionné par le type de fluide, la technique de captage et de stockage envisagés. Les cycles de Rankine vapeur sont, dans l'état actuel des technologies, les plus largement déployés. Ces installations sont de ce fait dénommées centrales solaires thermodynamiques à concentration.

Il en existe quatre grands types : les centrales à tour, à collecteurs paraboliques, à miroirs de Fresnel et à collecteurs cylindro-paraboliques. Suivant le cas ils sont fixes ou mobiles, les deux premiers sont à concentration ponctuelle les autres à concentration linéaire.



**Figure 8** – Les divers types de capteurs solaires à concentration (source AIE)

Les centrales solaires thermodynamiques ont un avantage notoire sur les centrales photovoltaïques (cf. § suivant) : la production d'énergie ne s'arrête pas lorsqu'il n'y a plus de soleil. En effet, si elle possède un réservoir de stockage du liquide chauffé, la centrale peut continuer à produire de l'électricité sans ensoleillement. Généralement, ces capacités de stockage peuvent représenter entre 7 et 15 heures de fonctionnement.

De telles installations ne présentent de l'intérêt que sur les territoires très ensoleillés recevant un rayonnement de l'ordre de 2.800 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ce sont ceux situés au sud-ouest des États-Unis, au nord du Chili et de l'Argentine, en Europe du sud, en Afrique du nord et du sud, dans la péninsule arabique, en Iran et en Afghanistan, au Pakistan, au nord-est de l'Inde et en Australie. Ont ainsi été construites près d'une centaine de centrales solaires productrices d'électricité pour une puissance nominale totale de plus de 4 800 MW. Elles ont chacune une puissance allant de 0,25 à 377 MW. De nombreuses centrales ont été mises en service depuis l'implantation en 2008 de la centrale de Manzanares, près de Séville, d'une puissance de 11 MW, et de celle de Shams 1 près d'Abou Dhabi, inaugurée en 2013, à l'époque la plus grande centrale solaire d'une puissance nominale de 100 MW. L'Espagne avec 32 de ces centrales est le pays qui en possède le plus, elle est suivie par les États Unis qui en dénombrent une quinzaine dont Iwanpah en Californie, une centrale à 3 tours d'une puissance de 377 MW.

Cette dynamique mondiale pour les centrales solaires thermodynamiques - CSP Concentrated Solar Power en anglais - se poursuit, 30 sont en construction et 50 en projet : 20 en Chine, 13 en Espagne, 6 aux États Unis dont une de 2 000 MW dans le Nevada et une quinzaine répartie entre le Proche Orient, l'Afrique du Sud et le Mexique.

Au Maroc un plan vise à installer une capacité de production de 2 GW d'énergie solaire thermodynamique d'ici 2020, soit l'équivalent de 2 réacteurs nucléaires. Cette construction de centrales CSP doit permettre au pays de couvrir 42% de sa consommation d'électricité par les énergies renouvelables. Grâce à leur possibilité de stockage thermique elles contribueront à combler le déficit de production pendant les heures de pointe de la soirée. C'est ainsi que le projet solaire Noor à Ouarzazate dans le sud du Maroc est la vitrine des ambitions du royaume chérifien en matière d'énergies renouvelables. Dans cette vaste plaine aride aux portes du Sahara, ensoleillée 360 jours par an, s'érige le plus grand complexe solaire thermodynamique du monde. La première phase, Noor I, d'une capacité de 160 MW, est entrée en service en 2016. Son extension, programmée en trois étapes, portera sa puissance à 580 MW.

Un cas particulier est celui des centrales françaises à parabole, celle de Montlouis construit en 1949 et celle d'Odeillo dans les Pyrénées Orientales inaugurée en 1970. Il s'agit en fait de fours solaires laboratoires permettant d'atteindre des températures pouvant dépasser 3 500 °C destinés à des expérimentations à haute température puis, en 1983 dans cette même région, la centrale à tour Thémis d'une puissance de 2,5 MW, équipée de 200 réflecteurs a été mise en service et fut en cela une des premières au monde. Arrêtée en 1986, elle a été réhabilitée 20 ans après pour devenir une centrale pilote utilisant une technologie à air comprimé. Toujours dans les Pyrénées Orientales, à Llo, en 2019 a été mise en service une centrale à miroirs de Fresnel de 9 MW qui génère de la vapeur d'eau super critique pouvant assurer une autonomie de production d'électricité de 4 heures.



**Figure 9** - La centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnels de Llo (Pyrénées Orientales)

En Europe, en 2020, les centrales thermodynamiques ont une capacité de 30 GW produisant 89,8 TWh/an d'électricité. Quant aux perspectives mondiales, à l'horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie prévoit une contribution de cette technologie des centrales solaires thermodynamiques à hauteur de 11,3% de la production d'électricité avec plus de 1 000 GW de capacité installée.

## 5. L'énergie solaire photovoltaïque

Les photopiles, ou capteurs photovoltaïques ou encore 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). Leur découverte remonte à 1941, les premières cellules fabriquées par Bell Telephone Lab. avaient un rendement de conversion<sup>1</sup> de 6%. Aujourd'hui, en laboratoire, elles atteignent un rendement de 33% et les versions industrielles entre 14 à 18 % pour celles en silicium polycristallin et 16 à 24 % pour le silicium monocristallin. 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.

Installées sur des toitures pour les petites productions domestiques, les plus grosses productions sont assurées par des panneaux photovoltaïques disposés au sol sur de grandes surfaces, à l'échelle de l'hectare voire plus, on parle alors de « fermes solaires » ou de « parcs solaires ». L'implantation de ces fermes solaires dont la taille est de plus en plus importante est en tout lieu, en plein développement. Ainsi, en France, à Cestas

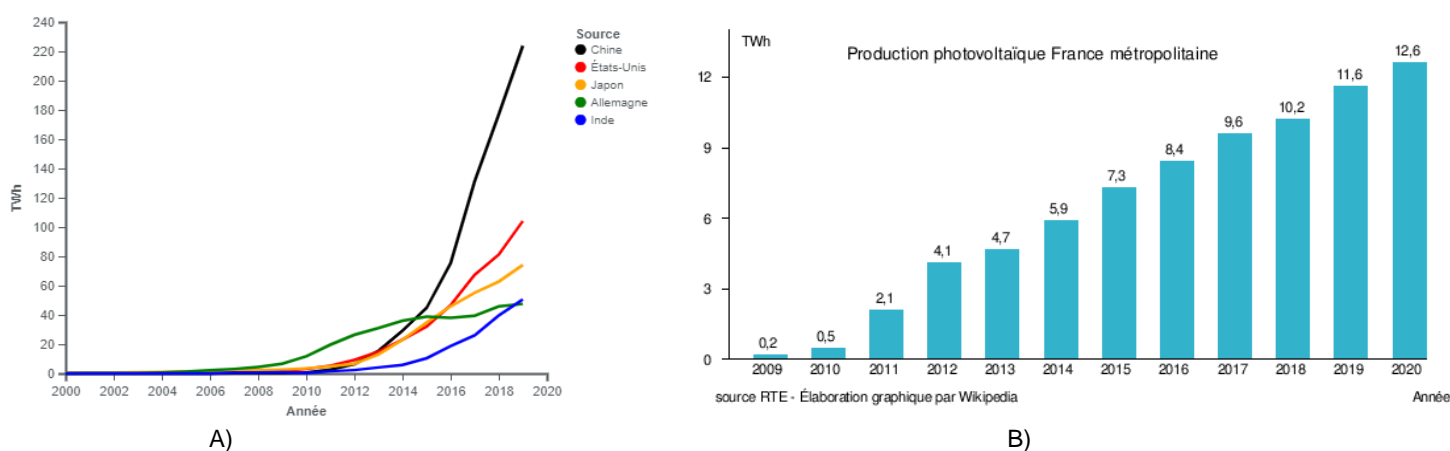
<sup>1</sup> Pourcentage de rayonnement solaire effectivement converti en électricité.

(Gironde), près de Bordeaux, une ferme solaire de 230 hectares compte plus d'un million de panneaux, installés sur une friche forestière causée par la tempête de 1999. Elle a une capacité totale de 300 MWc, et est en mesure de produire en moyenne 350 GWh par an. Dans le Longyangxia Dam Parc, dans la province du Qinghai, dans le nord-est de la Chine, a été installée une ferme solaire qui, elle, couvre une superficie de plus de 2700 ha, avec plus de 4 millions de panneaux d'une capacité de 850 MWc dont la production est régulée par une centrale hydroélectrique. Il existe même des centrales solaires flottantes. Ainsi et toujours en Chine, à Huainan, sur un ancien lac d'exploitation minière, a été mise en service en 2017 une centrale de 40 MWc couvrant 80 ha. Dans la même province, une autre centrale de 150 MWc est en construction depuis juillet 2017. En Australie c'est aussi une centrale flottante d'une puissance de 330 MWc qui est en chantier et en Inde est développé un projet d'une capacité de 648 MWc qui devrait recouvrir une surface de 1 000ha.

Quasiment démesuré est le projet de la société Sun Cable consistant à créer en Australie la plus grande ferme solaire au Monde qui devrait être opérationnelle en 2027. Etendue sur 12 000 ha, avec une puissance crête de 6 GW, il est prévu que l'énergie électrique produite soit acheminée vers Singapour par câbles sous-marins.

Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu qui, pour être utilisé ou injecté sur le réseau de distribution, doit être converti en courant alternatif par des onduleurs, une exigence qui à l'évidence implique, là encore, la mise en œuvre de grosses et coûteuses unités électrotechniques de puissance.

Suite à la très forte progression de ces dernières années, le photovoltaïque est le mode de conversion renouvelable en électricité le plus développé après l'éolien : 770 GWc installés dans le monde en 2020 dont 9,5 GWc en France (données AIE et EDF).



**Figure 10** - Evolution annuelle de la production d'électricité photovoltaïque  
A) des principaux producteurs mondiaux B) de la France

Pour ce qui est de l'avenir, l'Agence internationale de l'énergie, AIE, prévoit que la part du solaire photovoltaïque dans la production mondiale d'électricité pourrait atteindre 16 % en 2050.

Il faut noter que bien qu'à priori le photovoltaïque apparaisse plutôt destiné aux territoires ensoleillés, le fait que son rendement diminue lorsque la température augmente – de l'ordre de 0,5% par °C – a pour conséquence qu'il n'est pas sans intérêt dans les zones tempérées. C'est ainsi qu'il est développé en Europe du Nord et que l'Allemagne est le pays européen où cette énergie est la plus présente. Mais pour les zones à fort ensoleillement, comme il a été dit dans le § 4, les centrales thermodynamiques à concentration sont particulièrement adaptées et ce d'autant que leur rendement peut atteindre 30% au lieu des 15 à 20% de celui des centrales photovoltaïques.

## 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, animaient les scieries, les foulloirs à papier et même asséchaient les terres aux Pays-Bas. Aujourd'hui, ces moulins légendaires sont devenus de grandes hélices à trois pales qui se détachent à l'horizon des plaines et des plateaux venteux. Dans leur mouvement, elles entraînent des génératrices électriques, des « aérogénérateurs ». C'est au météorologue danois Poul La Cour que l'on doit la première mise au point dans les années 1890 de moulins à vent producteurs d'électricité.

Plus encore, Poul La Cour préoccupé par le stockage de l'énergie eut même l'idée de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau avec l'électricité fournie par ses éoliennes : un précurseur de notre actuelle filière d'hydrogène produit sans empreinte carbone.



**Figure 11** – Les éoliennes de Poul La Cour

La puissance unitaire des éoliennes, de nos jours, varie de quelques kW pour les éoliennes domestiques à plusieurs MW pour les éoliennes industrielles terrestres et bientôt 12 MW pour la plus grosse, l'Haliade X, une éolienne en mer de 260 m de haut. Cette géante est le modèle de celles destinées à être implantées au large des côtes françaises. Elles doivent être construites à partir de 2021 en partie à Saint-Nazaire et à Cherbourg par General Electric. Et pour l'avenir, la société germano-espagnole Siemens Gamesa prépare la « SG 14-222 DD » une éolienne qui affichera une puissance de 14 à 15 MW pour un rotor de 222 m de diamètre.

Pour une éolienne, lorsque la vitesse du vent varie et par suite que varie celle de son rotor, elle génère un courant à une fréquence variable qui ne peut être injecté sur le réseau de distribution. Pour cela, ce courant est redressé en courant continu et ensuite reconverti en courant alternatif à fréquence fixe grâce à l'utilisation d'un transformateur à thyristors ou à transistors. Le courant alternatif à ondes carrées qui en résulte n'étant pas le courant sinusoïdal souhaité, il est obtenu par le jeu d'inductances et des condensateurs appropriés. La conséquence est que pour son exploitation l'électricité éolienne nécessite la mise en œuvre d'une importante et coûteuse électrotechnique de puissance.

Comme dans le cas du solaire photovoltaïque, la réunion d'un ensemble d'éoliennes est dénommée une "ferme" ou un "parc". La mise en place de ces fermes se fait aussi bien sur terre qu'en mer, installation alors dite off-shore. La mer du Nord en particulier connaît de nombreuses de ces fermes en mer, off-shore, installées par le Royaume Unis, l'Allemagne et le Danemark.



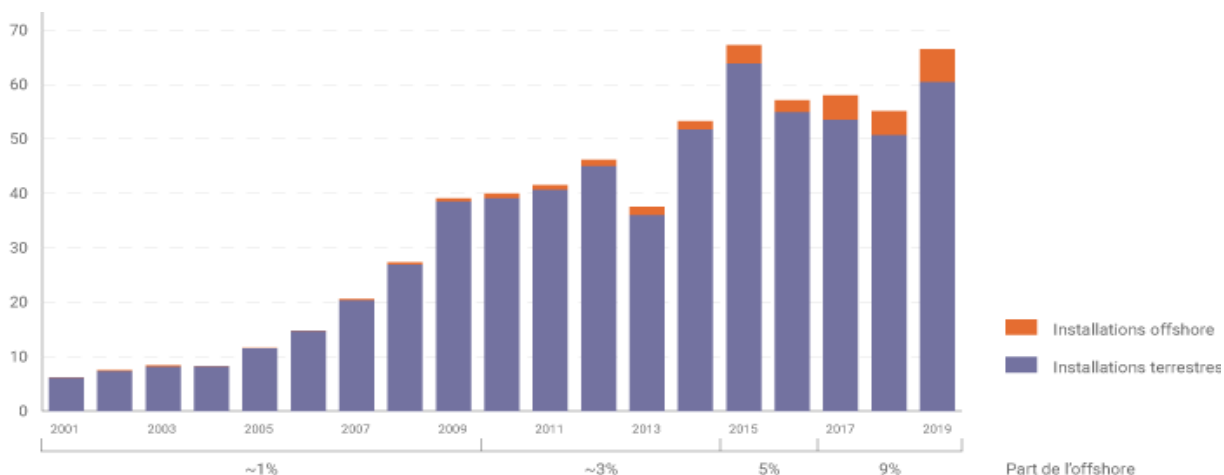
**Figure 12** - Parc éolien en Beauce



**Figure 13** – Prototype de l'éolienne Haliade X dans le port de Rotterdam

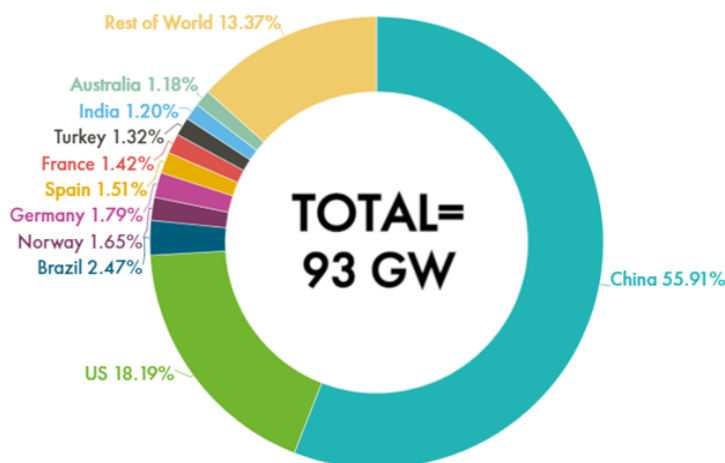
D'après le Global Wind Energy Council, GWEC, la puissance du parc mondial éolien installé fin 2020 était de 743 GW, résultat d'une progression de 93 GW répartie comme indiqué par la figure 14 ci-dessous.





**Figure 14** - Progression des installations d'éoliennes dans le Monde durant l'année 2020

Ce parc mondial devrait atteindre 817 GW en 2021 car depuis plusieurs années sa progression dépasse les 60 GW par an comme le montre le graphique de la figure suivante :



**Figure 15** – Progression annuelle, en GW, de la puissance éolienne installée dans le monde (donnée GWEC)

Pour la France, la puissance électrique éolienne totale raccordée était de 17,3 GW à la fin 2020 (donnée ENEDIS) avec pour cette même année une production de 39,7 TWh, soit 8,9% de la consommation électrique nationale.

## 7. L'énergie issue de 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 (vaporemformage, pyrolyse, méthanisation ...) elle peut se stocker sous une forme plus concentrée : biogaz (méthane), méthanol, éthanol, esters, hydrogène ....

En 2018, selon l'Agence Internationale de l'Energie, la biomasse fournissait 15 400 TWh d'énergie, soit 9,3 % environ de l'énergie primaire consommée dans le monde dont 518,5 TWh d'électricité renouvelable, soit 1,9 % de la production mondiale d'électricité, et 4 % environ des carburants routiers.

En France la biomasse-énergie est la principale source d'énergie renouvelable, d'une capacité de 2,5 GW. Elle représente plus de 55 % de la production de cette énergie avec une capacité de production électrique de 1,5 GW produisant 7,7 TWh d'électricité renouvelable par an (données EDF 2019). Elle provient de l'exploitation des forêts, de celle des résidus de cultures annuelles et de celle des déchets organiques d'élevage et de celle 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!*

## **Le bois-énergie**

A côté de ce qui est destiné à la construction et à la menuiserie, une partie du bois est utilisé comme combustible: le bois-énergie et ce de deux manières:

- La combustion directe, 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 leur territoire. Ainsi plusieurs millions de nos compatriotes l'utilisent, dans les cuisinières, les poêles, les chaudières et les cheminées. La récente prise de conscience de la nocivité de cette combustion du bois : émission de particules fines, CO, CO<sub>2</sub>, COV, acroléine, noyaux benzéniques etc. a conduit les autorités à en réglementer sérieusement l'utilisation. Afin de limiter la quantité de bois brûlé sont privilégiés les systèmes à haut rendement (75% pour les chaudières les plus performantes alors qu'elle n'est que seulement que de 10 à 20% pour la majorité des cheminées à foyer ouvert). Mais ce bon rendement s'il diminue la quantité des rejets de gaz à effet de serre de particules et de polluants nocifs pour la santé ne les élimine pas pour autant. Néanmoins, la France favorise cet emploi du bois, tant pour les particuliers que pour la mise en place de chaudières alimentant des réseaux de chaleur communaux. Une situation pour le moins contestable du point de vue du respect de l'environnement et en cela contraire aux engagements à la fois de la Loi sur la transition énergétique et des accords de Paris de la COP 21 sur le climat !

Si le bois, à priori, est bien une source renouvelable qui absorbe le dioxyde de carbone, en tant que combustible, son bilan carbone souvent présenté comme nul est loin de l'être. Dans cette évaluation est en effet omis le solde négatif dû à l'abattage, au sciage, et au transport, autant d'opérations très consommatrices de carburant rejetant du dioxyde de carbone qui n'est pas pris en compte dans le bilan de celui que les arbres ont pu absorber durant leur existence. Un solde négatif encore alourdi si le bois est transformé et conditionné en plaquettes ou particules.

- Sa transformation en 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. Des gaz à partir desquels on peut obtenir du carburant synthétique par réaction de Fischer Tropsch. C'est le principe ancien - tombé en désuétude puis remis progressivement au goût du jour - des gazogènes qui avaient fait leur apparition au siècle dernier durant la seconde guerre mondiale.

## **Les biocarburants**

Une autre voie de valorisation de la biomasse est son traitement pour fabriquer des biocarburants qui généralement sont ajoutés aux carburants d'origine fossile pour les rendre moins nocifs pour l'environnement. On en distingue deux types: ceux destinés aux moteurs à essence et ceux destinés aux moteur diesel.

Pour les moteurs à essence :

### L'éthanol

Cette voie est relativement récente puisque son développement significatif remonte à la fin du siècle dernier aux Etats-Unis avec l'utilisation du maïs pour fabriquer de l'éthanol (bioéthanol). L'Europe s'est laissé ensuite convaincre et dès l'année 2000, la Commission Européenne a incité les pays membres à inclure au moins 5,75% de biocarburants dans l'essence 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. Est distribuée sous la forme du SP95-E10, une essence qui contient que 10% d'éthanol. Mais dans certaines stations-service, se trouve sous l'appellation « bio-éthanol » E85-15 un carburant contenant 85% d'éthanol mélangés à 15% d'essence, il est moins onéreux pour le consommateur car moins polluant, il est moins taxé.

### L'ETBE, l'éthyl tertio butyl éther

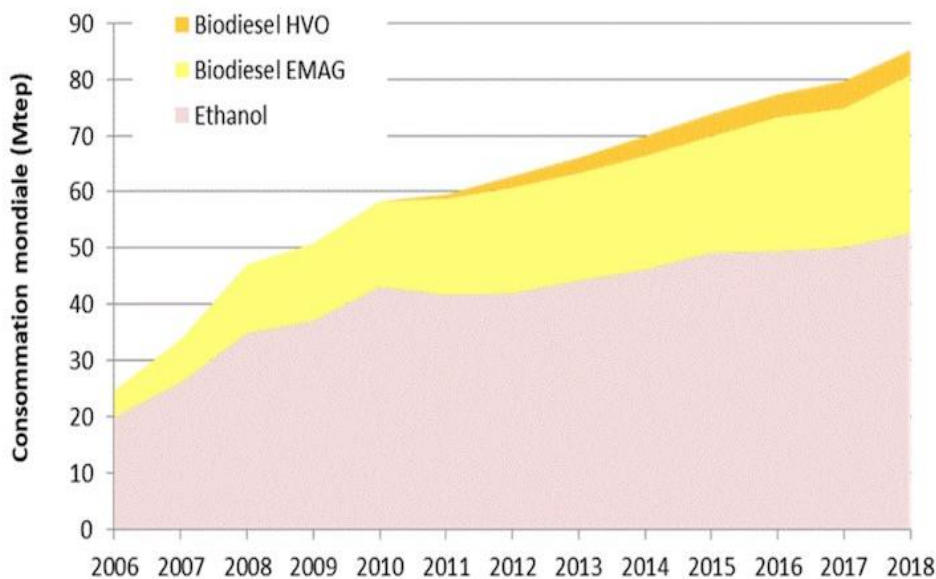
Il s'agit d'un dérivé de l'éthanol d'origine agricole auquel est ajouté de l'isobutène d'origine chimique. Cet ETBE est incorporé jusqu'à 15% dans les carburants SP95 et SP98 et jusqu'à 22% dans le SP 95-E10.

Pour les moteurs diesels, les biocarburants, couramment dénommés biogazoles ou biodiesels, sont issus :

- d'huiles issues de plantes oléagineuses comme le colza, le tournesol, la palme, le soja ;
- d'huiles végétales alimentaires usagées et récupérées ;
- de graisses animales.

Les bilans énergétiques, environnementaux et surtout alimentaires de ces biocarburants dits de "première génération", se sont rapidement révélés mauvais<sup>2</sup>, en comparaison d'autres biocarburants issus de biomasses comme les lignocellulosiques, carburants dit de "deuxième génération", issus de déchets végétaux (résidus de tailles, d'exploitation forestière etc.) ainsi que des biomasses marines - algues et micro algues – qui eux sont des biocarburants dits de troisième génération. De nouvelles voies sont en cours de développement.

La plus grosse consommation mondiale de biocarburants est celle des transports routiers, elle atteignait 85 Mtep en 2018 avec depuis 2006 la forte progression que montre la figure 16. En 2018, la consommation de biocarburant routier a atteint en France 3,2 Mtep (donnée IFPEN 2020).



**Figure 16** - Evolution de la consommation mondiale de biocarburants dans les transports routiers (source IFPEN)

Pour les voitures de particuliers, la France fut le premier pays européen à déployer l'usage du carburant SP95-E10 contenant jusqu'à 10 % en volume d'éthanol. Il est devenu le premier carburant consommé avec une part de marché de près de 48 % en 2019 et même 50 % en 2020.

L'aviation est aussi un secteur pour lequel est envisagé le recours aux biocarburants. Actuellement le kérosène produit à partir de colza ou d'huile de palme représente moins de 0,1 % de la consommation du secteur aérien. Seulement cinq aéroports dans le monde (aucun en France) en fournissent régulièrement. A l'avenir, les biocarburants pour l'aéronautique devront eux aussi être de deuxième génération, c'est-à-dire non pas d'huiles issues de culture dédiées mais produits à partir de déchets végétaux agricoles ou forestiers ou encore à partir d'huiles alimentaires ou de graisses usagées. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit une production mondiale de biokérosène en 2024 entre 1 et 2,5 milliards de litres sur les quelque 280 milliards de litres consommés. Il est estimé qu'il sera difficile de faire mieux que ces quelques pourcents de la demande sans que cette production n'entre rapidement en conflit avec la production alimentaire, la biodiversité, les usages des sols et de l'eau, et les autres utilisations de la biomasse.

### Les déchets

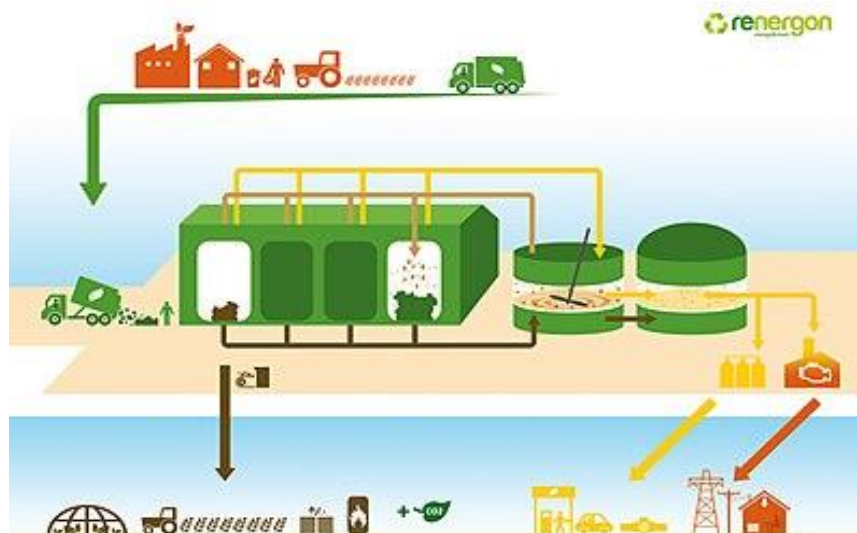
Cette source d'énergie est incorporable aux énergies renouvelables extraites de la biomasse. Les déchets peuvent en effet :

---

<sup>2</sup> Le Mexique, par exemple, s'est rapidement trouvé en déficit de maïs, une des bases de ses ressources alimentaires.

- Soit fournir de la chaleur utile dans les usines d'incinération qui produit de la vapeur destinée à des réseaux de chauffage urbain ou de production d'électricité ;
- Soit, pour ceux qui sont fermentescibles (certains déchets ménagers, agricoles, d'industries alimentaires) produire du biogaz par digestion anaérobie dénommée méthanisation, du biogaz composé de 50 à 60% de méthane et de gaz carbonique (cf. Fiche 3.3.1). Le méthane obtenu est directement utilisé comme combustible ou est injecté dans le réseau de gaz naturel. Le dioxyde de carbone peut, lui, être combiné à de l'hydrogène (réaction de Sabatier) pour produire du méthane de synthèse, un recyclage vertueux de ce gaz à effet de serre. La récupération du biogaz de décharge est obligatoire en France depuis 1997, elle est réalisée par un dispositif du type de celui exposé [Fiche 3.3.1](#) de la présente rubrique « Tout savoir sur l'hydrogène » ;

**Figure 17** - Méthanisation : collecte des déchets, stockage, digestion, valorisation en digestat et biogaz (source Renergon)



- Soit pour ceux qui sont lignocellulosiques, être traités par thermo-chimie pour produire du gaz de synthèse, mélange hydrogène-monoxyde de carbone utilisable pour la synthèse de carburant. Ou encore, ce monoxyde de carbone en réaction avec de l'eau est converti en hydrogène et dioxyde de carbone, nouveau mélange pouvant produire du méthane de synthèse.

## 8. Conclusion

Les énergies renouvelables et surtout l'électricité d'origine renouvelable, pourraient apparaître comme en mesure de remplacer en grande partie les énergies fossiles pour devenir la base de l'approvisionnement énergétique de la planète. Difficile à affirmer. Ce sont des énergies diluées qui pour être exploitées à grande échelle demandent des mises en œuvre importantes et coûteuses. Leur impact sur l'environnement n'est guère positif car elles nécessitent de grands espaces dont elles perturbent la faune et la végétation et le plus souvent l'aspect visuel quand ce n'est pas une réelle dégradation des paysages. Qui plus est, elles sont intermittentes et instables donc nécessitent des installations énergétiques de compensation. Enfin, essentiellement disponibles sous forme d'énergie électrique, elles sont des formes d'énergie qui ne sont pas stockable. En revanche, elles représentent des alternatives bien adaptées à des zones à faible concentration d'habitat (village, hameaux, exploitations agricoles isolées) ou à faible concentration d'activités (entreprises hors agglomérations) ou encore à des territoires insulaires et ce, d'autant que leur mise en réseau peut permettre de compenser leur manque de continuité.

Quant à la valorisation des énergies renouvelables autrement que par la fourniture directe d'électricité, la filière hydrogène se révèle comme l'une de plus prometteuse pour contribuer au succès de la transition énergétique. C'est cette production massive d'hydrogène obtenu sans empreinte carbone à partir d'électricité renouvelable qui est l'un des objectifs principaux du volet hydrogène du plan gouvernemental de relance de septembre 2020.

Enfin, pour ce qui est du bilan et des perspectives de ces énergies renouvelables dans le monde, l'Agence Internationale de l'Energie dans son dernier son rapport « Renewable Energy Market Update », en a publié les

principaux aspects. Elles connaissent leur plus forte croissance depuis deux décennies. Les capacités d'électricité renouvelable ajoutées en 2020 ont augmenté de 45 % pour atteindre 280 GW. Les ajouts de capacité éolienne ont presque doublé (114 GW) mais ralentiront en 2021. De son côté, le solaire « continuera de battre de nouveaux records », les ajouts annuels devant s'élever à plus de 160 GW d'ici à 2022. L'Europe devient le deuxième plus grand marché des EnR après la Chine. L'AIE y prévoit une augmentation des capacités installées de 11 % en 2021, pour atteindre 44 GW et 49 GW en 2022. Le marché est porté par l'Allemagne qui « continuera à fournir la plus grande capacité de production d'énergie renouvelable », suivie par la France.

---

### Sources

Memento de l'énergie 2018 CEA

<https://www.cea.fr/english/Documents/scientific-and-economic-publications/MEMENTO-2018.pdf>

Chiffres clés des énergies renouvelables Édition 2020

<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-35995-chiffres-cles-enr-2020.pdf>

Etude stratégique de la filière hydrolien marin ADEME 2018

[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etude\\_hydrolien\\_marin\\_-\\_version\\_publiee.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etude_hydrolien_marin_-_version_publiee.pdf)

2020, année record pour l'éolien dans le monde

<https://www.agenceecofin.com/dossier/3004-87778-2020-annee-record-pour-l-eolien-dans-le-monde>

L'éolien en France

[https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2020/10/ObsEol2020\\_web\\_light\\_v3.pdf](https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2020/10/ObsEol2020_web_light_v3.pdf)

L'électricité renouvelable en France

[https://tecsol.blogs.com/files/panorama\\_t4\\_2020\\_bd2.pdf](https://tecsol.blogs.com/files/panorama_t4_2020_bd2.pdf)

Renewable Energy Market Update, AIE

<https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021>