

Energies Renouvelables :

Opportunités,

Variétés



&



Synergies



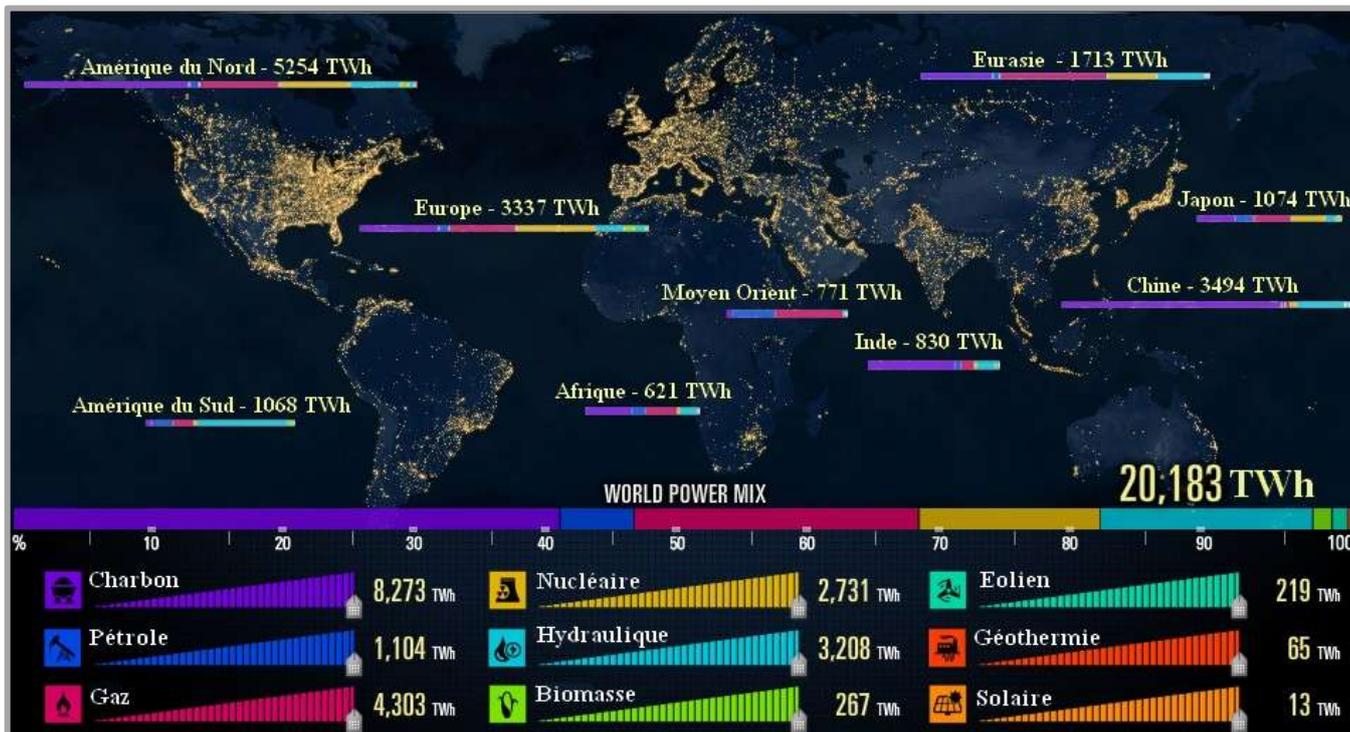
SOMMAIRE

Introduction	p.3
1. Présentation des principales sources d'énergies renouvelables	
a. L'énergie hydraulique	p. 4
b. L'énergie éolienne	p. 4 à 5
c. L'énergie solaire	p. 5 à 6
d. L'énergie nucléaire	p. 6
e. L'énergie géothermique	p. 7
f. L'énergie de la biomasse	p. 7 à 8
g. Les énergies marines	p. 8 à 9
2. Le stockage et les combinaisons inter énergies	
a. Le stockage sous-terrain : géothermie et air comprimé	p.10
b. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	p.10
c. Les batteries	p.11
d. Le méthane et l'hydrogène	p.11
Conclusion	p.12
Annexe bibliographique	p.12

Energies Renouvelables : Opportunités, Variétés et Synergies.

L'épuisement de nos ressources fossiles et la hausse du phénomène d'effet de serre nous confronte à de nouvelles problématiques pour préserver notre environnement.

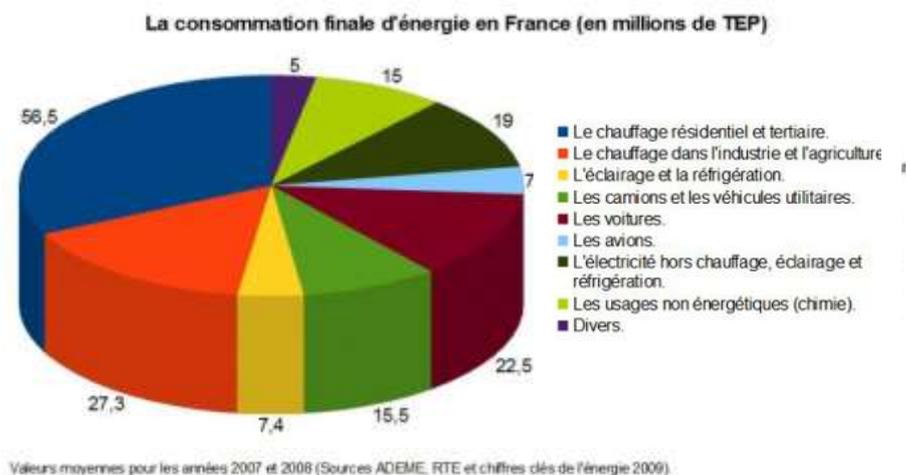
Comme le montre la carte ci-dessous, le monde a consommé en 2008 environ 20 000 TWh dont 68% provenaient du pétrole, gaz, charbon ... des énergies accentuant l'effet de serre. On atteint même 81% d'énergies actuellement non renouvelables en incluant le nucléaire au trio précédent.



Carte de production de l'énergie mondiale en 2008 – National Geographic

Le constat actuel et les prévisions de doublement de notre consommation d'énergie d'ici 2050 nous obligent aujourd'hui à changer profondément notre plan énergétique en augmentant la part des énergies propres et renouvelables.

Ainsi, l'intégration de ces nouvelles sources dans notre modèle représente un défi complexe tant par leurs caractéristiques variées que par la nécessité d'optimiser leur combinaison pour réussir à satisfaire nos besoins toujours croissants. Pour cela, l'énergie et ses différentes sources doivent être économiquement rentables, afficher de bons rendements, être disponibles et si possible adaptées à l'utilisation finale comme le montre le graphique ci-dessous.



Valeurs moyennes pour les années 2007 et 2008 (Sources ADEME, RTE et chiffres clés de l'énergie 2009)

Répartition de la consommation d'énergie en France en 2007

Ce mémoire s'articulera donc sur une présentation des différentes énergies renouvelables suivie de quelques propositions pour atteindre une synergie complémentaire.

1. Présentation des principales sources d'énergies renouvelables

a. L'énergie hydraulique

L'hydroélectricité est actuellement l'énergie renouvelable la plus répandue : avec plus de 3600 TWh, elle représentait 19% de la production mondiale en 2008. Le coût de cette énergie est très bas : 20€ / MWh.

L'électricité est générée par la transformation de l'énergie potentielle stockée par les barrages et l'énergie cinétique issue du courant des rivières. Il existe donc deux types de centrales :

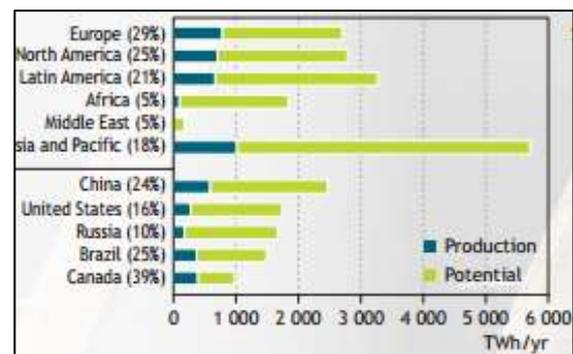
- Les **centrales de rivière** ont un facteur de charge variant de 20 à 95% selon leur situation, la moyenne française étant de 50%.
- Les **barrages hydroélectriques** peuvent fournir une grande quantité d'énergie sur demande et ce, très rapidement. Ils sont ainsi utilisés pour ajuster la production aux fluctuations soudaines sur le réseau. Cependant les sites potentiels d'implantation de barrages sont limités et leurs installations peuvent avoir des empreintes environnementales fortes : déplacement de 2 millions de Chinois et disparition de 436 km² pour le barrage des trois Gorges d'une capacité de 22GW.

La production des centrales de rivières peut être fortement impactée par le volume des précipitations et est donc sensible aux épisodes de stress hydrique. L'utilisation de l'eau pour générer de l'électricité peut aussi créer des tensions sur la répartition des ressources entre différents utilisateurs (agriculture, ...) voire les pays comme l'Egypte et l'Ethiopie pour le Nil ou encore les différents états américains et le Mexique avec le Colorado.

Le potentiel annuel hydroélectrique mondial est estimé par l'Agence Internationale à l'Energie (AIE) à 16 000 TWh et n'est exploité actuellement qu'à 20% comme indiqué sur le graphique ci-contre.

Par contre beaucoup de pays déjà industrialisés, comme la France, exploitent la quasi-totalité de leur potentiel.

De plus, les éventuelles capacités énergétiques sont inégalement réparties dans le monde : dix pays en concentrent 66%.



Potentiel et production hydroélectrique selon l'AIE

b. L'énergie éolienne

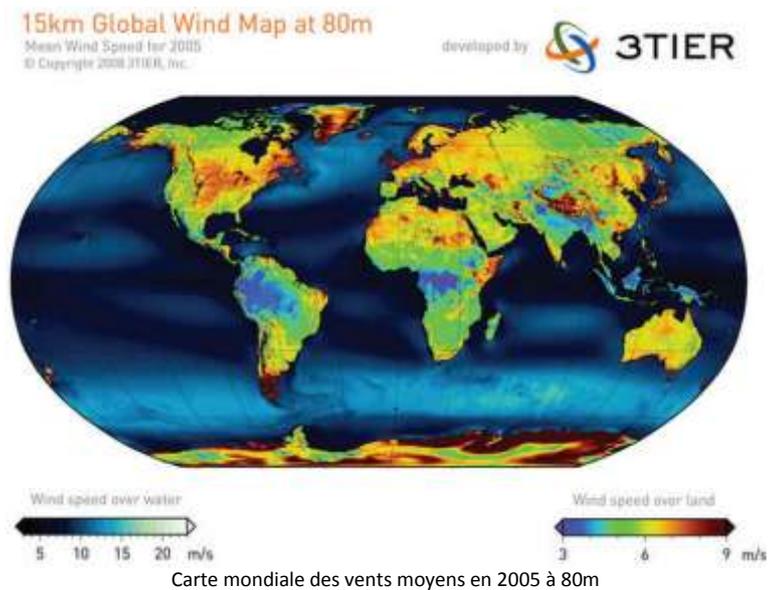
L'éolien est une nouvelle source d'énergie renouvelable qui produit l'électricité en convertissant l'énergie cinétique du vent avec un rendement de 40%. La ressource en vent est difficilement prévisible avec exactitude et il y a rarement corrélation avec les pics de consommation ce qui nécessite un éventuel stockage de l'énergie. On distingue communément deux grands types d'installation éolienne selon leur implantation :

- **L'éolien terrestre** est déjà actuellement compétitif avec un coût de 80€ / MWh, ce qui est comparable à l'hydraulique ou aux énergies fossiles. De plus, la surface occupée au sol par l'éolienne est très réduite : environ 30 m² pour des unités de 2,5 MW.
L'énergie produite est cependant très intermittente avec un facteur de charge de 20 à 25%. L'éolien terrestre est aussi critiqué pour son impact environnemental : visuel, dégâts sur la faune aviaire, bruit ...
- **L'éolien off-shore**, installé en mer jusqu'à 50m de profondeur, est confronté à des vents plus puissants et constants ce qui augmente le facteur de charge à 35% en moyenne. Une éolienne marine peut produire entre 35 et 100% de plus qu'une éolienne terrestre de puissance égale.
Les éoliennes marines fournissent une énergie au coût actuellement très élevé d'environ 220€ / MWh. Le raccordement et la pose de l'éolienne représentent 25% chacun du prix de l'énergie. Ce coût devrait cependant diminuer avec le facteur d'échelle induit par un large déploiement et l'emploi de fondations flottantes qui accélèrent et facilitent largement l'installation de l'éolienne tout en donnant accès aux gisements éoliens plus productifs avec 300m de profondeur maximum.

En 2012 la capacité mondiale était de 280 GW et la production fut de 534TWh.

Il est difficile d'estimer le potentiel global de la ressource en vent : il est très variable et doit être de 7m/s pour activer l'éolienne. Cependant l'étude récente de l'université de Stanford suggère une puissance potentielle exploitable de 40 à 80 TW pour l'éolien à 100m. En gardant le même ratio énergie – puissance installée en 2012, on produirait entre 70 et 140 PWh soit 3 à 6 fois la consommation d'énergie mondiale.

Le potentiel ci-dessus pourrait évoluer suite au développement actuel d'éoliennes de haute altitude aéroportées et de l'éolien flottant.



c. L'énergie solaire

L'énergie solaire génère de l'électricité ou de la chaleur en convertissant le rayonnement via des cellules. Il s'agit d'une source très intermittente nécessitant l'appoint d'autres énergies ou l'utilisation de stockage. On peut globalement prévoir la production trois jours à l'avance grâce aux modèles informatiques, notamment Préole utilisé par RTE. Par contre, le cycle solaire a une excellente corrélation avec les besoins énergétiques entraînés par la climatisation.

Il existe principalement trois types d'installations : le **photovoltaïque**, le **thermique** et le **solaire à concentration**.

Le **photovoltaïque** et les panneaux thermiques ont l'avantage de pouvoir valoriser des espaces inutilisés sans entretien, notamment les toitures qui représentaient en 2007 environ 300 km² exploitables en tenant compte d'une orientation au sud, ... La prévision de production sur cette surface était de 45TWh annuels à partir d'une puissance de 45GW (facteur de charge de 11%).

Cependant ces solutions solaires se heurtent à de nombreux obstacles. Leur rendements et leurs facteurs de charge sont très faibles : rendement de 15% pour le photovoltaïque avec un facteur de charge de 10 à 15% selon les régions françaises. Donc cela oblige à installer une puissance de production beaucoup plus conséquente par rapport à d'autres sources d'énergie. De plus, la production instantanée d'un panneau seul peut varier brusquement de 100 à 10% en moins d'une minute avec, par exemple, un passage de nuage. Il faut alors compter sur une vaste répartition territoriale pour atténuer ces effets passagers et éventuellement utiliser d'autres sources d'énergie.

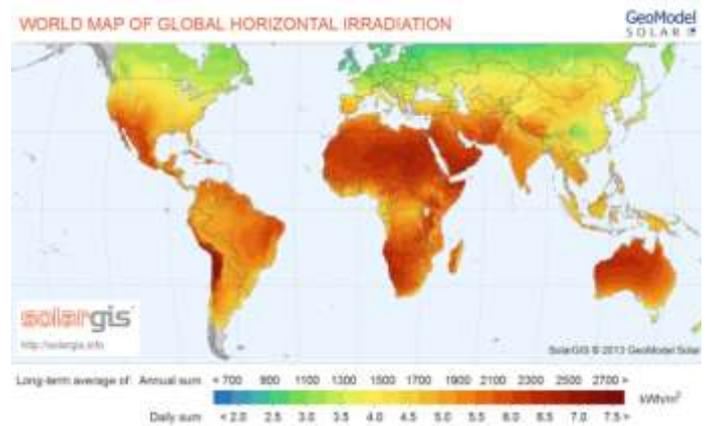
L'énergie solaire est actuellement la plus chère des énergies disponibles : d'environ 230€ pour les installations moyennes à 370€ / MWh pour les installations plus petites pour particuliers en France. Le solaire n'est donc pas une énergie rentable et compétitive à l'heure actuelle pour les projets de petite envergure avec les conditions d'ensoleillement de l'Europe continentale. Cependant, les prix des composants, sont en baisse constante : division par 5 des prix des modules entre 2009 et 2014. La tendance devrait continuer même si cette diminution sera de moins en moins marquée. On peut déjà trouver de grandes installations ayant un coût de 90 €/MWh dans les pays les plus ensoleillés.

Une solution émergente pourrait être l'usage de **panneaux hybrides Photovoltaïques Thermiques (PTV)**. Ces derniers produisent quatre fois plus d'énergie que le photovoltaïque traditionnel grâce à un panneau solaire thermique qui assure le refroidissement des cellules photovoltaïques. Ces dernières fournissent alors 30 à 40% d'électricité supplémentaire atteignant des rendements de 20%. Le panneau produit trois fois plus d'énergie sous forme thermique, laquelle peut être directement utilisée pour le chauffage d'habitation ou de l'eau. Le coût du matériel, actuellement le plus élevé, devrait diminuer de façon significative comme ses prédécesseurs photovoltaïques.

Le solaire à concentration utilise des réflecteurs au sol pour concentrer le rayonnement sur un collecteur. Il existe plusieurs technologies utilisant différents types de miroirs.

Certaines techniques atteignent 30% de rendement électrique direct, la chaleur étant stockée ou utilisée pour d'autres usages.

Ainsi, la tour solaire espagnole Gemasolar utilise 6500 tonnes de sels fondus pour stocker la chaleur excédentaire et produire plus longtemps de l'électricité y compris de nuit. Elle atteint un facteur de charge annuel d'environ 62% en fonctionnant 6500h.



Rayonnement solaire mondial KWh/m²

Ces centrales ont besoin d'un ensoleillement plus élevé que les installations photovoltaïques usuelles. Leur installation est donc limitée aux terres recevant annuellement plus de 1800KWh/m² : le sud des Etats-Unis, le désert chilien, l'Australie, les pays méditerranéens et le Moyen Orient. Ces dernières régions côtières envisagent même d'employer le solaire à concentration pour dessaler l'eau de mer avec des coûts à terme compétitifs : 0,6 € par mètre cube et 7 à 17 cts / KWh selon des études allemandes et celle de SolarPaces.

d. L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est produite à partir de réactions physiques, généralement issue de la fission d'atomes lourds d'uranium 235 et de plutonium. Cette réaction crée de la chaleur utilisée pour générer de la vapeur faisant tourner des turbines. Le réacteur nucléaire a une très forte production due à la densité énergétique exceptionnelle de l'uranium : un million de fois supérieure aux combustibles fossiles. Cette énergie est relativement propre à produire : les seules émissions de CO₂ proviennent de l'extraction et du transport du combustible.

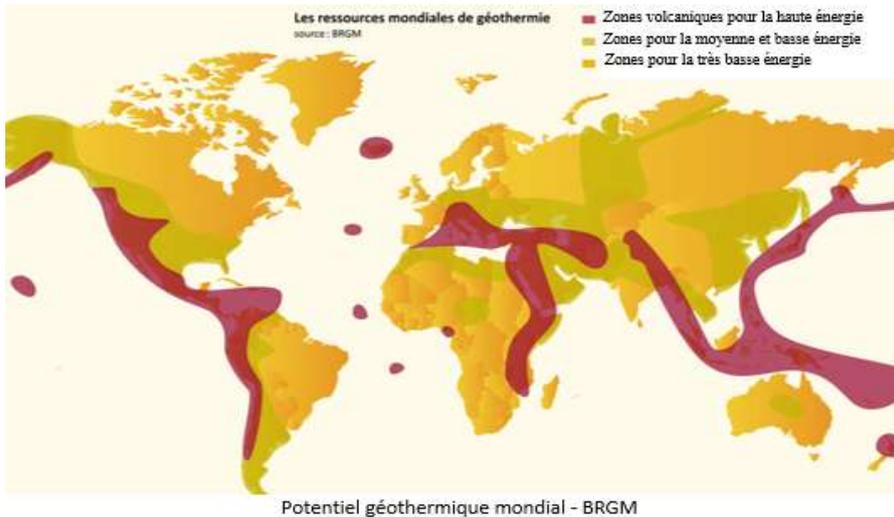
Par contre, une centrale nucléaire a une grande inertie pour démarrer et arrêter sa production : un réacteur a besoin de deux jours pour atteindre sa puissance. On ne peut donc pas utiliser le nucléaire comme source d'appoint mais plutôt comme production de fond pour palier à des épisodes météorologiques défavorables à d'autres énergies.

Le nucléaire est surtout confronté à des problèmes sociétaux d'acceptation. En effet, de nombreuses controverses ont émergées sur :

- les risques d'accident notamment après les incidents de Fukushima et Terchnobyl
- le coût affiché pour certains projets comme le dépassement de 4,5 milliard d'euros du prototype EPR.
- le traitement du combustible nucléaire dangereux pendant des milliers d'années
- le démantèlement des centrales et le coût engendré : déjà 4 milliards d'euros sur 20 ans pour la centrale de Greifswald comprenant cinq réacteurs de 400MW.
- le coût réel du nucléaire, évalué actuellement à 50€ / MWh incluant les opérations ci-dessus pour les réacteurs 2^e génération dont le montant estimé est encore assez vague dû au manque de retour à grande échelle.

La pénurie d'uranium 235 et le problème de gestion des déchets pourront être réglés avec les réacteurs à neutrons rapides, dits de 4^e génération dont le 1^{er} prototype français ASTRID arriverait dans les années 2020. Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettent d'utiliser tout l'uranium et notamment l'isotope 238 qui constitue plus de 99% du minerai. De plus, ces réacteurs possèdent deux types de fonctionnement déjà testés sur d'anciens projets tel que SuperPhénix : ils peuvent générer du combustible (rendant cette énergie renouvelable) ou incinérer les déchets dangereux à longue durée de vie, laquelle est réduite alors de milliers d'années à 300 ans. Toutefois, même si ces réacteurs sont intéressants, l'inertie de leur production ne pouvant pas couvrir des pics de consommation électrique, il faudra limiter leur nombre. Cette limite sera à considérer surtout en l'absence de stockage suffisant ou en cas d'intégration majeure de sources d'énergie intermittentes comme l'éolien ou le solaire.

e. L'énergie géothermique



L'énergie géothermique utilise la température du sous-sol pour générer de l'électricité, de la climatisation ou du chauffage.

Le gisement géothermique peut être partiellement rechargé selon un cycle saisonnier : il donne de la chaleur l'hiver et en absorbe l'été tout en augmentant sa durée de vie.

C'est une énergie constante avec un très bon facteur de charge : 70 à 90%. Cependant, le rendement énergétique et sa rentabilité dépendent fortement de la nature et de la température des sols.

On distingue deux types principaux de géothermie :

- La géothermie de basse et très basse énergie utilise des sols de température inférieure à 90°C pour générer de la chaleur ou du froid. En France, la puissance installée en 2011 était de 1850 MWh thermique. Elle assure le chauffage des logements et de l'eau de 500 000 habitants dont une grande partie en Ile de France grâce à l'aquifère du Dogger. Dans le monde, plus de 70 pays produisaient de la chaleur géothermique en 2005 pour un total estimé de 70 MWh, pompes à chaleurs exclues.
- La géothermie de haute et moyenne énergie permet la production d'électricité. Elle se situe généralement dans les zones à gradient thermique élevé (zones bordées sur la carte) qui correspondent aux régions volcaniques. Il y a actuellement 350 installations de ce type dans le monde. Par contre, leur faible rendement électrique (15%) diminue leur rentabilité avec des coûts de 120€ / MWh pour la centrale de Bouillante en Guadeloupe. L'emploi de la cogénération pour utiliser la chaleur devrait permettre d'améliorer le rendement financier et énergétique. L'expérience technologique d'EGS qui à Soultz en Alsace utilise la fracturation hydraulique des sols controversée pourrait ne pas déboucher sur des centrales rentables. On a également noté une hausse de l'activité micro-sismique empêchant cette installation à proximité de grandes villes.

La géothermie est néanmoins appelée à se développer prochainement avec la baisse des coûts et certaines innovations. Pour la très basse géothermie, nécessitant des pompes à chaleurs, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) développe actuellement une solution économique pour particuliers (10 k€ tout compris) avec une empreinte au sol réduite avec l'utilisation de corbeilles géothermiques.

f. L'énergie de la biomasse

La biomasse est l'énergie tirée des matières organiques provenant principalement de l'agriculture (résidus de cultures, lisiers), de l'exploitation forestière, de culture d'algues et de nos déchets (boues d'épurations, déchets d'industries organiques, graisses d'abattoirs, etc ...).

La biomasse est déjà une énergie largement répandue dans le monde avec une production estimée de 600 TWh dont 250 électriques. Elle est très bon marché avec en moyenne un prix de 40 à 70€ / MWh. C'est une énergie disponible à la demande rapidement et en quantité surtout en réponse à des besoins de chauffage : les chaufferies au bois démarrent en quelques heures et celles utilisant le gaz réagissent en trente minutes.

Même si son utilisation libère du CO₂, cette source d'énergie est considérée comme propre car la combustion ne libère que le carbone qui avait été piégé par le combustible d'origine organique.

La biomasse possède trois utilisations principales : la **combustion** dans les centrales électriques et thermiques, la production de **biogaz** ou à l'avenir celle des **biocarburants**.

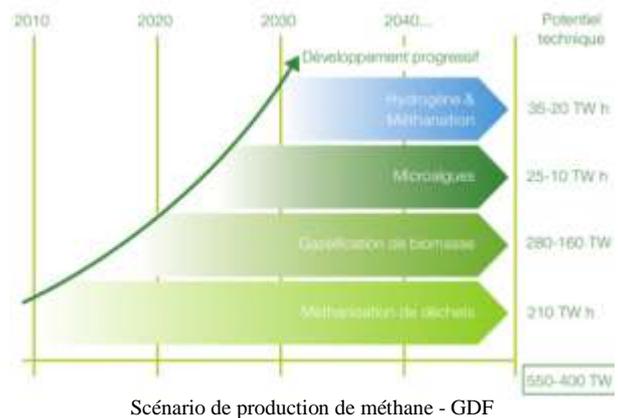
Les centrales de combustion de biomasse et les incinérateurs de déchets ont des rendements élevés : jusqu'à 90% en cogénération dont plus de la moitié sous forme de chaleur.

Le plus grand gisement de combustible pour ces centrales est le bois dont un stère équivaut à 1480 kWh. En 2011 en France, la consommation en bois énergie équivaut à plus de 104 TWh pour le chauffage principalement à usage domestique avec 80%. Actuellement, le potentiel du bois énergie est sous exploité en France : environ 60% de la croissance naturelle biologique de la forêt est valorisée.

Le deuxième plus grand gisement de biomasse à savoir l'agriculture, permet de produire du biogaz lors de la décomposition anaérobie des déchets organiques. Après purification, il peut être transformé en biométhane pour être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant.

Les deux gaz peuvent être utilisés pour produire en cogénération de l'électricité et de la chaleur, laquelle est réutilisée dans le processus de production.

Actuellement, c'est la seule alternative durable au gaz naturel fossile. De plus, le coût de production sont peu élevés : pour une production de 500 m³/h, on paie 0,06 € / kWh de biogaz et 0,07€ / kWh de biométhane.



Là encore, le potentiel est important : GDF estime possible la production en France des 500 TWh de gaz consommés annuellement.

Concernant les biocarburants, intéressants mais encore en cours de développement, la compétition avec les cultures vivrières disparaît progressivement avec les 2^e et 3^e générations qui utilisent les algues et les parties inutiles des plantes nutritives pour leur production.

La biomasse a pour avantage d'être une ressource locale mais pour atteindre son impressionnant potentiel, il faudra surtout organiser une collecte structurée des matières valorisables à grande échelle.

g. Les énergies marines

Les mers et les océans, qui occupent 70% de la surface terrestre, forment une source importante d'énergie. En dehors de l'éolien off-shore et de l'utilisation de la biomasse marine, présentés ultérieurement, l'océan présente actuellement trois types d'énergies intéressantes en cours de développement : les **hydroliennes**, les **systèmes houlomoteurs** et l'**énergie thermique des mers** (ETM).

Les **hydroliennes** sont comparables à des éoliennes sous-marines, exploitant les courants océaniques ou ceux des marées. Les hydroliennes sont généralement beaucoup plus petites que les éoliennes grâce à la densité de l'eau très supérieure à celle de l'air et ont un facteur de charge plus élevé.

Cependant, les sites propices pour l'installation des hydroliennes sont très limités. Avec 3GW potentiels produisant 10 TWh selon EDF, la France concentre 20% du potentiel européen. Le potentiel mondial atteint seulement 75 GW.

L'**énergie thermique des mers** exploite le gradient de température entre les eaux en surface et en profondeur. Elle n'est disponible que dans les régions tropicales où l'eau peut atteindre 25°C avec 5°C au fond.

Tout comme la géothermie, on peut l'utiliser pour réguler la température des bâtiments car elle est utilisée pour climatiser : certains projets à la Réunion visant 50 à 75% de diminution de la consommation électrique dédiée à cet emploi. Un démonstrateur flottant de 16 MW électrique est en cours de réalisation en Martinique.

L'énergie des vagues, dite **houlomotrice** est plus largement répartie sur le globe. Actuellement plus d'une centaine de technologies différentes sont testées ou en développement. On retrouve des systèmes de panneaux oscillants sous-marins et des bouées qui entraînent des pompes hydrauliques, des 'serpents de mer' tels que l'Anaconda, tuyau flexible de 200m en caoutchouc et les systèmes à colonnes d'eaux oscillantes installés à terre.

Actuellement, aucun système n'est exploité commercialement hormis la centrale de Mutriku de 300 kW (technologie à colonne d'eau oscillante) qui est intégrée dans la digue protégeant le port.



Zones d'intérêt pour l'énergie houlotrice

La majorité de ces technologies marines étant encore émergentes, il est encore tôt pour estimer précisément le potentiel techniquement exploitable global et le coût de production de l'énergie produite.

Ces énergies devraient toutefois être plus chères à cause du coût de raccordement au réseau et d'adaptation au milieu marin : conception spécifique, matériaux non corrosifs, installation, exploitation et maintenance spécifiques.

Cependant, l'énergie marine présente plusieurs avantages de taille. Comme les courants marins et les vagues sont prévisibles avec précision plusieurs jours à l'avance, la production peut être anticipée.

Ces technologies ne concurrencent généralement pas d'autres activités humaines et n'occupent qu'un espace négligeable sur les littoraux. Espace d'autant plus précieux qu'actuellement 60% de la population mondiale (3,8 milliards d'individus) vivent dans les régions littorales. On estime que cette concentration augmentera à 80% d'ici 2050.

Les énergies marines proposent donc une énergie produite près des principaux centres de consommation sans occuper d'espaces à forte valeur.

OOOO OOOO OOOO OOOO

Les technologies présentées précédemment formeront certainement la base de notre futur système énergétique. Leurs principales caractéristiques intéressantes sont rappelées dans le tableau ci-dessous.

Energie	Continuité	Prévisibilité	Types d'énergies	Coût (€ / MWh)	Emplacement spécifique ?
Eolien	Intermittente	Moyenne	Electricité	50-80 on-shore 220 off-shore	Terres et régions côtières
Solaire Photovoltaïque	Intermittente	Moyenne	Electricité et Chaleur	200-250	/
Energies marines	Intermittentes hors ETM	Très bonne		/	Régions côtières
Solaire à concentration	Possibilité continue	Bonne		180 - 220	Régions très ensoleillées
Hydraulique	Continue	Bonne	Electricité	20 - 50	/
Géothermie	Continue	/	Electricité et Chaleur	Variable 35 - 125	Régions volcaniques pour l'électricité
Nucléaire	Continue	/		50	/
Biomasse	Continue	/		Variable 35 - 125	/

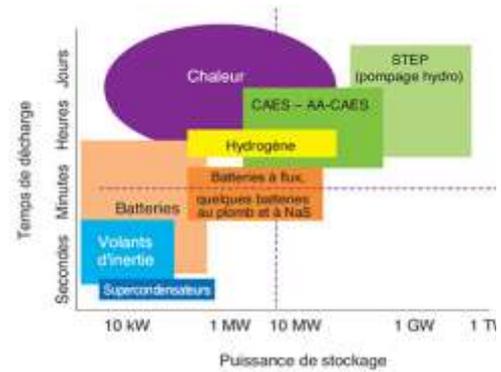
Récapitulatif des différentes sources d'énergies renouvelables

Notre système énergétique intégrera donc deux types de sources d'énergies : les intermittentes dont la production pourra être prévue plus ou moins précisément à l'avance et celles produites en continue qui, si elles manquent de souplesse par rapport à l'équilibre du réseau, devront être supplées par des solutions de stockage.

2. Le stockage et les combinaisons inter énergies

Le stockage de l'énergie doit être adapté au mieux selon son utilisation finale : chaleur, électricité, transport, ...

Les différentes technologies se distinguent avec comme caractéristiques principalement intéressantes : la forme d'énergie stockée, le rendement, la puissance, la capacité énergétique et le prix. Les faibles volumes de stockage comme les futures batteries électriques automobiles et les ballons d'eau chaude forment d'importants réservoirs d'énergie grâce à leur nombre très élevé. Cependant, il y a parfois besoin de stocker l'énergie à plus grande échelle pour des usages spécifiques ou de plus longues durées. Actuellement la seule solution de stockage massive, durable et technologiquement mature est le pompage hydraulique.



Classement des technologies de stockage en terme de puissance et de temps de décharge

a. Le stockage sous-terrain : géothermie et air comprimé

Avec de grands volumes disponibles et l'étanchéité relative géologique, différentes formes de stockage sous terrain sont envisagées pour l'électricité et la chaleur. On utilise alors en général des aquifères et ou d'anciennes cavités minières.

Le **stockage géothermique** de la chaleur et de la fraîcheur est déjà employé. Il existe deux types d'installations :

- Les stockages d'énergie thermique dans les aquifères comportent deux zones, une chaude et une froide qui permettent le transfert d'énergie pour réchauffer ou refroidir juste en modifiant le sens de circulation des fluides caloporteurs de l'installation en surface.
- Les stockages diffusifs dans les roches avec les champs de forages thermiques. Cette technologie peut être géographiquement plus répandue. La chaleur de l'été est stockée dans les roches pour être restituée en hiver. Le stockage peut prendre plusieurs années pour atteindre son efficacité : la communauté canadienne Drake Landing Solar a pu pleinement employer l'énergie solaire accumulée en sous-sol pour se chauffer seulement à partir de la 3^e année. Un autre exemple important est le terminal E de l'aéroport de Zurich qui extrait 470 MWh de froid l'été, et 1,1 GWh de chaud l'hiver, réduisant de 75% sa consommation pour ces postes.

L'électricité peut être emmagasinée grâce à l'**air comprimé stocké** (CAES). En heure creuse de consommation, l'air est comprimé dans un réservoir puis est libéré à travers une turbine en heure de pointe. Il existe deux installations industrielles actuellement : 0,9 GWh et 290 MW à Huntorf en Allemagne, 110 MW à McIntosh en Alabama. Le rendement du processus est faible, 40% environ. Mais le stockage de la chaleur libérée par la compression du gaz dans les futurs prototypes avec cycles adiabatiques (AA – CAES) augmenteront ce rendement à 70%.

b. Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

Actuellement, les STEP sont utilisées pour stocker 99% de notre électricité à des coûts très bas. Les stations sont constituées de deux bassins d'altitudes différentes : l'eau est pompée vers le réservoir supérieur en heure creuse pour être déversée pendant les pics de consommation.

Les STEP sont historiquement installées en montagne. On observe plus récemment des STEP marines artificielles, placées au-dessus des littoraux comme à Okinawa au Japon ou sur des îles. L'île d'El Hierro aux Canaries, territoire de 8000 habitants est autonome en électricité, sa production étant totalement renouvelable grâce à la combinaison avantageuse de cinq éoliennes et de sa STEP.

Les STEP offrent une solution de stockage avec de multiples avantages pour compenser les sources d'énergies intermittentes et les fluctuations dans le réseau électrique : de grandes capacités et volumes de stockage combinés à une réactivité sans égale par rapport aux demandes du réseau.

c. Les batteries

Il existe actuellement de nombreuses technologies de batteries électriques et de recherches pour les améliorer. Les plus utilisées, composées de lithium ne peuvent pas servir convenablement au stockage d'énergie car leur charge est trop lente. Leur prix relativement élevé et leur dangerosité peuvent aussi être problématiques.

Par contre, de nouveaux matériaux et procédés en développement pourraient être intéressants à l'avenir : les batteries à flux dont la capacité est limitée par la taille de leur réservoir ou encore celles composées de carbone et d'aluminium se chargeant 20 fois plus vite, plus sûres et supportant des cycles de charge répétés sans dégradation.

Même si actuellement, des batteries de forte puissance, 1MW sont dédiées spécifiquement au stockage de l'énergie, elles seront probablement couplées à d'autres utilisations à l'avenir. Le scénario le plus plausible est l'utilisation des batteries des véhicules électriques pour stocker l'électricité car la technologie de charge et de décharge intelligente existe déjà. De plus, une voiture est inutilisée en moyenne 95% de son temps de vie et les trajets quotidiens, 40km en France, sollicitent moins de 20% de la batterie. Le potentiel de stockage d'énergie est très important : en supposant une proportion électrique de 33% parmi les véhicules particuliers en France, soit 10 millions de Renault Zoé, on peut contenir 250 GWh avec les batteries actuelles et jusqu'à 500 GWh avec les batteries de 50kWh qui seront lancées en 2017.

Les batteries du futur formeront donc de grandes capacités de stockage d'électricité pour permettre d'absorber les fluctuations quotidiennes du réseau électrique.

d. Le méthane et l'hydrogène

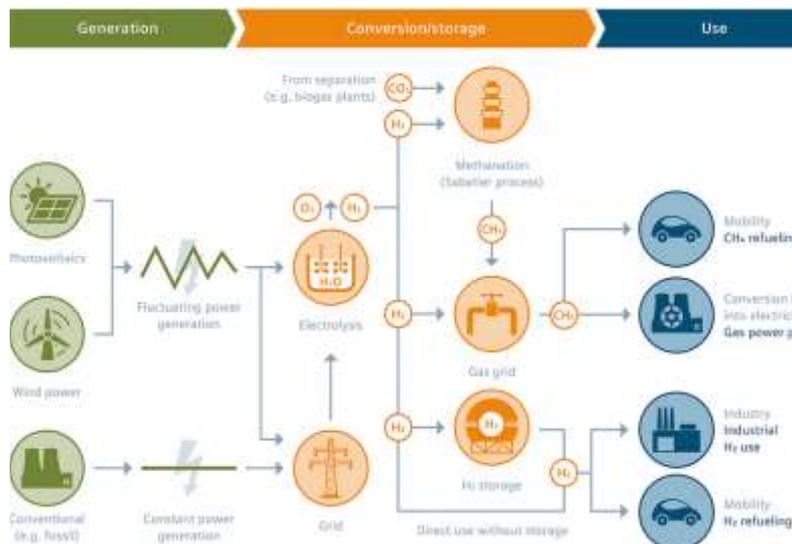
L'énergie électrique peut être également stockée sous forme de gaz, principalement le méthane CH₄ et l'hydrogène H₂.

L'hydrogène est généré à partir d'électricité grâce à l'électrolyse de l'eau avec un rendement de 80%. Il a une densité massique en énergie 3 à 4 fois supérieure aux énergies fossiles mais la densité volumique en énergie est beaucoup plus faible. Il faut donc stocker un plus grand volume de gaz pour obtenir la même quantité d'énergie par rapport au gaz naturel (méthane) et à l'essence. Le stockage et la sécurité forment ainsi les principaux problèmes de l'hydrogène : aucune technique n'est satisfaisante aujourd'hui. En général, l'hydrogène doit être considérablement refroidi pour être stocké dans des volumes acceptables à moins d'être fortement comprimé.

L'hydrogène peut être utilisé de différentes façons : dans les piles à combustible d'un rendement moyen de 60%, comme carburant sous forme liquide ou encore pour la production de méthane synthétique. Dans ce cas, on recycle du CO₂ avec l'hydrogène pour reformer de l'eau et du méthane selon la réaction exothermique de Sabatier avec un rendement de 60% sans récupération de chaleur. Le choix de l'hydrogène ou du méthane sera fait en fonction de l'utilisation finale. Actuellement, le méthane est plus favorisé puisqu'il s'utilise comme le gaz naturel (transport, chauffage, ...) alors que l'emploi de l'hydrogène est relativement plus rare. Le prix élevé des piles à combustible est également un frein à l'utilisation de l'hydrogène.

Le cycle de conversion de l'électricité en gaz n'a pas un rendement excellent au moment de restituer cette énergie : il est évalué de 40% en récupérant juste l'électricité à 60% par cogénération de chaleur.

L'intérêt de stocker l'électricité dans le gaz est de pouvoir utiliser le réseau et ses infrastructures de stockage déjà existants : 300 TWh sont disponibles en France, soit plus de la moitié de la consommation annuelle du pays.



Cycle du stockage électrique dans le gaz : power to gas

CONCLUSION

Il n'existe pas de recette typique pour bâtir un système énergétique à partir d'une seule énergie dans le monde. Au contraire, il faudra en partie s'adapter aux ressources territoriales et gérer la combinaison des différentes énergies et réseaux.

L'énergie thermique consommée sera fournie en majeure partie par les océans pour la climatisation des littoraux tropicaux tandis que le solaire, la géothermie et la combustion de biomasse composeront la majeure partie du chauffage pour le reste du monde. Le stockage géothermique saisonnier et les centrales thermiques à gaz (CH₄) permettront de faire face respectivement aux périodes de demandes prolongées et aux pics de consommation. Le CO₂ issu de la combustion du méthane ou de la biomasse sera réutilisé dans le cycle de production du gaz ou pour la production de biocarburants à base d'algues.

Le réseau électrique sera beaucoup plus alimenté avec des énergies renouvelables intermittentes. Une des clés pour la réussite de ce système sera de prévoir avec précision la production et la consommation d'électricité. Si en effet, l'énergie hydraulique et le nucléaire formeront une base de production constante, il faudra nécessairement employer des moyens de stockage journaliers tels que les batteries des véhicules et l'air comprimé stocké dans les réservoirs géologiques. Pour de plus grandes demandes énergétiques, les STEP et les réserves de gaz pourront apporter des capacités plus importantes de stockage et un support aux demandes de plus longues durées.

Concernant le choix des énergies renouvelables, il est très probable que le solaire à concentration soit massivement utilisé dans les régions ensoleillées proches de l'équateur grâce à ses capacités de production nocturne et de dessalement de l'eau de mer. En dehors du nucléaire, l'électricité des autres régions sera plus diversifiée avec un apport conjoint de l'éolien, du solaire et si possible des énergies marines et hydrauliques.



Système énergétique décarboné et renouvelable

L'efficacité de ce système global pourra être améliorée avec les principes de co et tri génération basés sur la récupération des énergies thermiques froides et chaudes lors de la production d'électricité.

Une production plus intelligente combinée à une meilleure utilisation de l'énergie permettra une réduction significative de nos besoins..

Annexe bibliographique : Principales sources

Présentations des sources d'énergies

<http://www3.ademe.fr/bretagne/upload/document/fichier/185fichier.pdf>

Université de Stanford : rapport Energy Policy - étude des potentiels en ressources renouvelables :

<http://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/JDEnPolicyPt1.pdf>

Agence Internationale à l'Énergie : rapport sur l'énergie hydraulique - Hydropower Essential, 2010

Etudes sur le dessalement de l'eau de mer combiné au solaire à concentration :

Institut technique thermodynamique du centre aérospatial allemand :

<http://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resourcen/dokumente/institut/system/projects/aqua-csp/AQUA-CSP-Full-Report-Final.pdf>

Etude SolarPaces :

http://www.solarpaces.org/images/task/SolarPaces_TaskVI_CSPD_Activity_Final_Report.pdf

Photovoltaïque :

http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/82574_feuillederouteelectricitephotovoltaique.pdf

Géothermie :

Sites et documents affilié au BRGM

<http://www.geothermie-perspectives.fr/>

http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2010104945_SERGothermie20100607LD.pdf

L'énergie de la biomasse & Sites relatifs au biométhane

<http://www.aile.asso.fr/wp-content/uploads/2011/07/Brochure-technique-PRODUIRE-du-BIOMETHANE.pdf>

<http://www.cegibat.grdf.fr/biomethane-et-injection-sur-le-reseau-de-gaz-naturel>

Fédération nationale du bois : <http://www.fnbois.com/fr/bois-energie>

Rapport gouvernemental sur les énergies marines 2013 :

http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/RAPPORT_ENERGIES_MARINES_2013.pdf

Stockage sous terrain de l'énergie :

Louis-Marie Jacquelin, Anne-Gaëlle Bader. Le stockage souterrain de l'énergie, Géosciences

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01061149/document>

Coût de l'énergie:

Site l'énergie en question :

<https://www.lenergieenquestions.fr/les-couts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>

Rapport 2014 de l'IRENA :

http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf