



AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES  
ÉNERGIES DÉCARBONÉES : SOLUTIONS  
POUR LES COMBINER EFFICACEMENT  
*Mémoire – Concours Sauvons le Climat 2015*

Solenn Samedy  
*Grenoble INP – ENSE3*

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>1</b>
<b><i>I. Présentation des énergies décarbonées.....</i></b>	<b>2</b>
<b><i>I.1. La nécessité des énergies décarbonées .....</i></b>	<b>2</b>
<b><i>I.2. Leurs avantages &amp; inconvénients .....</i></b>	<b>3</b>
❖ La biomasse .....	3
❖ Le solaire.....	4
❖ La géothermie.....	5
❖ L'hydraulique .....	6
❖ L'éolien .....	6
❖ L'énergie nucléaire .....	7
<b><i>II. Les mix énergétiques.....</i></b>	<b>8</b>
❖ En Europe .....	8
❖ En France .....	9
<b><i>III. La gestion des énergies.....</i></b>	<b>9</b>
❖ Le bâtiment.....	10
❖ L'industrie .....	10
❖ Les transports .....	10
❖ Le captage stockage du CO <sub>2</sub> et sa valorisation .....	10
❖ Arbre à vent .....	11
❖ Avatar .....	11
❖ Smart Grids .....	12
❖ Bilan .....	12
<b><i>IV. L'aspect politico-économique.....</i></b>	<b>13</b>
<b><i>CONCLUSION .....</i></b>	<b>13</b>

“L'artiste ne doit pas copier la nature mais prendre les éléments de la nature et créer un nouvel élément” affirmait Paul Gauguin. Afin d’assurer son avenir, l’Homme devra donc laisser s’exprimer ses talents artistiques : il ne devra pas tenter de rivaliser avec la nature en lui imposant sa propre loi indépendamment des conséquences, mais comme le dit le peintre, il s’agira de se servir des ressources qu’elle offre afin de construire un futur durable pour ses descendants.

## I. Présentation des énergies décarbonées

“Pour sauver un arbre, mangez un castor !” Henri Prades

### I.1. La nécessité des énergies décarbonées

Avec ces propos, l’archéologue français soulève un problème de taille puisque le changement climatique et les forêts sont étroitement liés. En effet, les arbres stockent le CO<sub>2</sub> atmosphérique avant de réaliser la photosynthèse et permettent ainsi de lutter contre le changement climatique. Leur surexploitation permet donc de moins en moins d’atténuer le phénomène et elles peuvent même devenir, lorsqu’elles sont détruites ou incendiées, des sources de CO<sub>2</sub>. De plus, le fonctionnement biologique des forêts est déjà altéré par la modification des conditions climatiques, mettant en danger leur durée de vie. Pour limiter ce genre d’effet néfaste et les autres, il faudrait alors manger une quantité considérable de castors... C’est pourquoi d’autres solutions doivent être mises en place afin de transformer le système énergétique actuel.

Aussi, environ deux tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone en 2012 étaient dues au secteur de l’énergie (Agence Internationale de l’énergie - Energy Technology Perspectives 2015), mettant en évidence l’importance de l’innovation dans le domaine des technologies énergétiques à bas carbone et la diminution de la part des énergies fossiles, qui, dans tous les cas, sont amenées à disparaître comme le met en évidence le graphique ci-dessous :

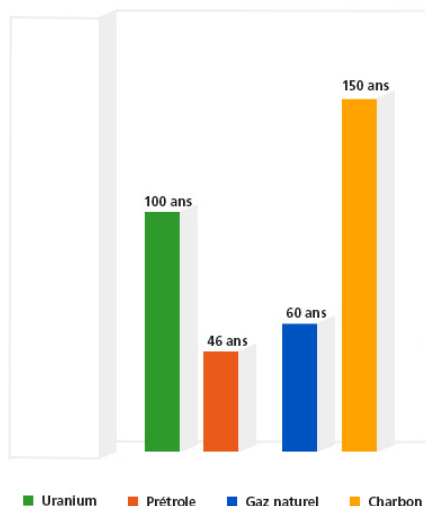


Figure 1 : Durée de disponibilité restante pour les énergies fossiles - Source : AIE, World Energy Outlook 2010

Un autre paramètre doit être pris en compte : Le CME (Conseil Mondial de l’Energie) a construit deux scénarii et estime que la consommation totale en énergie primaire va passer de 13 041 Mtep en 2010 à 20 995 Mtep dans le scénario “Jazz” (un monde tourné vers le consommateur) et à 16 624 Mtep dans le scénario “Symphonie” (un monde où il existe un consensus politique sur l’environnement) en 2050. Cela correspond à une augmentation de 61 % dans Jazz et 27 % dans Symphonie, ce qui est beaucoup. A titre de comparaison, entre 1990 et 2010, la consommation mondiale d’énergie primaire a augmenté d’environ 45 %.

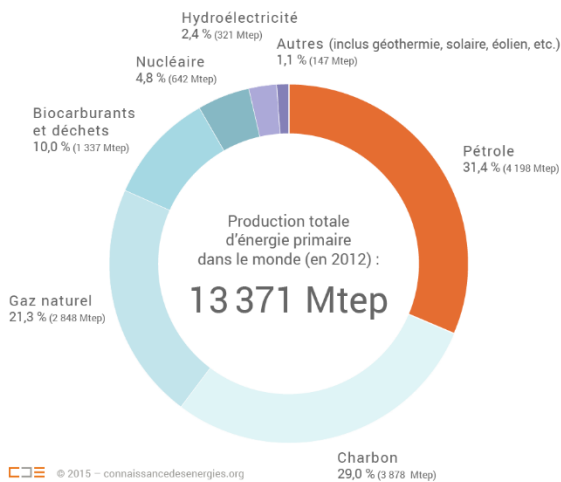


Figure 2 : Production mondiale d'énergie primaire en 2012, d'après les données du Key World Energy Statistics 2014 de l'AIE

Enfin, selon les scénarios de l'AIE et du GIEC, ce changement correspond à une multiplication par deux de la demande mondiale en électricité d'ici à 2050, même en considérant que les actions de maîtrise des consommations seront deux fois plus importantes que celles réalisées durant les 30 dernières années.

**Il s'agit donc de tenir compte de ce double enjeu : l'augmentation de la consommation et la préservation de l'environnement.**

Pour le moment, la production mondiale d'énergie primaire se décompose de la manière ci-contre (en 2012).

C'est ici que l'importance des énergies décarbonées intervient puisqu'elles permettraient de pallier aux problèmes évoqués précédemment en remplaçant en partie les combustibles fossiles. Il est donc essentiel d'augmenter leur part dans le mix énergétique. Des accords ont déjà été signés avec par exemple l'engagement de l'Union Européenne en décembre 2008 dit "des trois 20" en 2020 : 20 % d'énergies renouvelables, 20 % de gaz à effet de serre en moins, 20 % d'efficacité énergétique en plus, et 10 % de biocarburants.

Dans la partie suivante seront présentés les diverses énergies décarbonées avec les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire.

### 1.2. Leurs avantages & inconvénients

#### ❖ La biomasse

La biomasse est une énergie dérivée de l'énergie solaire grâce à la photosynthèse des végétaux. Elle a longtemps été la principale source d'énergie de la société. La biomasse se présente sous formes gazeuse (biogaz), liquide (agrocarburants) ou solide (bois). Elle est exploitée pour la production de chaleur, d'électricité, de carburants pour les transports. L'électricité issue de la biomasse est principalement produite en Amérique et en Europe de l'Ouest. Les agrocarburants sont depuis longtemps utilisés au Brésil et aux États-Unis, premiers producteurs d'éthanol.

Chaque année, la production de biomasse mondiale est de l'ordre de 1000 PWh, soit 8 fois la consommation énergétique mondiale. Mais toute cette biomasse n'est pas exploitable puisqu'une grande partie des organismes qui la constituent est essentielle pour les écosystèmes. Son potentiel reste néanmoins énorme et diffère beaucoup selon les scénarii. La production totale pourrait par exemple atteindre 27 110 Mtep en 2050 (Hoogwijk et al., 2003), ce qui permettrait théoriquement de couvrir la totalité des besoins futurs. Cela dépendra surtout de la disponibilité des terres exploitables.

Son principal avantage réside dans le fait qu'elle est « neutre » en termes d'effet de serre. En effet, la biomasse libère du CO<sub>2</sub> lors de la combustion mais comme le carbone est extrait récemment de l'atmosphère avec la photosynthèse, il peut être capté à nouveau par les plantes. Un autre avantage considérable est dans l'utilisation des déchets comme biomasse, cela réduit la pollution et augmente les ressources énergétiques.

Néanmoins, elle est renouvelable à condition d'être correctement utilisée (pollution par combustion mal maîtrisée et impacts du transport pour acheminer le bois), de ne pas être elle-même polluée ou contaminée au départ et dès lors qu'il n'y a pas surexploitation des ressources. Ce sont ses principaux inconvénients avec son coût encore très élevé et les éventuels problèmes de santé dus à une utilisation dans des foyers mal équipés.

### ❖ Le solaire

L'énergie solaire est renouvelable, elle n'émet pas de gaz à effet de serre. Elle a également un potentiel énorme puisqu'elle est disponible partout sur Terre et représente, théoriquement, 9000 fois la demande mondiale en énergie.

En revanche elle a aussi des inconvénients. L'un des principaux freins à son développement est sa production intermittente, dépendant des nuages, de la nuit, des saisons et des régions. A cela s'ajoute son coût d'investissement qui est encore très élevé.

Actuellement, sa part dans le mix énergétique mondial est inférieure à 1% mais connaît un développement rapide dans le monde (35%/an). Selon le GIEC, les scénarii de développement oscillent entre un rôle marginal et majeur de l'énergie solaire en 2050. Tout dépendra de l'innovation réalisée, de la réduction des coûts et de la mise en place de politiques adéquates.

Son exploitation peut se faire de trois manières :

- pour la production de chaleur : le solaire thermique,
- pour la production d'électricité : le solaire thermodynamique dit à concentration et le solaire photovoltaïque.

#### L'énergie solaire photovoltaïque

Elle a l'avantage de convertir directement l'énergie du Soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à des panneaux installés sur des bâtiments ou posés sur le sol. Au niveau mondial, la Chine est le premier pays producteur de cellules photovoltaïques avec 50% de la production mondiale et elle est un très gros exportateur de cellules. Les Etats-Unis sont également un gros producteur. En Europe, l'Allemagne est le premier pays européen en termes de MW installés. Un des avantages des panneaux photovoltaïques est qu'ils sont modulables et s'intègrent bien aux toitures, permettant ainsi de produire une partie de l'électricité nécessaire à une habitation sans occuper inutilement l'espace. Les systèmes sont fiables car aucune pièce n'est en mouvement et les matériaux employés résistent aux pires conditions climatiques. Le coût de fonctionnement est très faible car l'entretien est réduit. De plus, sur les sites isolés, c'est une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.

Cependant, au coût encore élevé d'investissement s'ajoute la nécessité de l'associer à d'autres sources ou à des moyens de stockage efficaces pour pallier au problème de son intermittence. De plus, il faut une grande emprise au sol si l'on veut produire une puissance importante. Une des solutions peut être de valoriser les zones désertiques. Enfin, le rendement reste encore relativement faible et diminue avec le temps.

#### L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique, quant à elle, désigne la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette énergie est aujourd'hui relativement bien maîtrisée en termes technologique et économique. Ses différentes applications sont, pour les habitations et le bâtiment, les chauffe-eau solaires ou chauffages solaires ; les cuiseurs solaires (répandus en Chine et en Inde) ou encore les cuiseurs paraboliques, les cuiseurs-boîtes, et autres fours solaires pour la cuisson. Elle a un potentiel intéressant puisqu'en Europe, l'eau chaude solaire représente 90 % du marché du solaire thermique.

De plus, cette énergie permet aux pays où l'ensoleillement est important une grande partie de l'année d'utiliser une énergie gratuite et illimitée d'améliorer les conditions de vie des habitants, comme en Afrique avec le lancement des fours solaires. Aussi, c'est un système totalement autonome et les rendements atteignent 30 à 60 %. Néanmoins, elle ne permet pas de réguler à elle seule la température d'un habitat sur toute l'année.

### L'énergie solaire à concentration

L'énergie thermique du Soleil permet aussi la production d'électricité par voie thermodynamique. La production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité.

Actuellement, 2 000 MW sont en construction et 11 000 MW en projet dans le monde. Des centrales thermiques existent déjà aux Etats Unis principalement, en Espagne et en Allemagne également. Elles représentent la technologie la plus probable pour le déploiement massif du solaire en Afrique du Nord. L'installation de ces systèmes sera vraisemblablement limitée aux pays de la ceinture solaire, l'investissement n'étant pas justifié pour des pays moins ensoleillés. De plus, elle présente des inconvénients similaires au photovoltaïque avec une emprise au sol importante et un coût su kWh encore élevé mais qui devrait décroître pour rejoindre celui du kWh issu de l'énergie fossile vers 2020.

### ❖ La géothermie

L'énergie géothermique est obtenue grâce à la chaleur de la terre. Il existe trois types principaux de géothermie :

- la géothermie très basse énergie et faible profondeur : avec des pompes à chaleur pour des usages domestiques (chauffage & refroidissement), dans l'habitat collectif et le tertiaire,
- la géothermie à basse et moyenne énergie à profondeur intermédiaire : avec des réseaux de chaleur géothermiques pour le chauffage d'un ensemble de bâtiments, la production de chaleur industrielle ou la production d'électricité,
- la géothermie à haute énergie et profondeur élevée : avec des centrales de production électrique pour la production d'électricité et de chaleur industrielle.

L'électricité produite à partir de la géothermie est disponible dans plus de 20 pays. Les trois premiers producteurs sont les États-Unis, les Philippines et l'Indonésie.

C'est la source d'énergie principale en Islande et ce sont les Philippines qui en sont le plus gros consommateur. La géothermie est également très rentable dans le Rift en Afrique. Trois centrales ont déjà été construites au Kenya, réduisant ainsi sa dépendance aux importations de pétrole. En Allemagne, une centrale de 3,4 mégawatts, utilisant la géothermie, fonctionne près de Munich depuis 2009, et produit en cogénération chaleur et électricité.

Contrairement à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur a l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), faisant d'elle une source d'énergie quasi-continue. De plus, la géothermie à très basse énergie est disponible dans tous les sous-sols de la planète, ce qui montre son potentiel important. Elle ne dégage que peu de gaz à effet de serre et ne laisse aucun déchet après utilisation. Elle n'a pas besoin d'être évacuée, et pas besoin d'être stockée.

Aussi, le prix du kilowattheure est compétitif et permet de réduire considérablement la facture énergétique des particuliers. Enfin, les gisements ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne).

Cependant, l'exploitation de cette énergie n'est pas sans inconvénient, notamment à cause du coût des forages. Certains sites sont aussi limités en fonction du type de roche et parfois difficilement accessibles. A noter également que forer n'est pas sans conséquence et peut amener à des affaissements de terrain ou à une augmentation des risques sismiques. Enfin, il peut parfois y avoir un dégagement nocif de faibles vapeurs de soufre.

## ❖ L'hydraulique

Les énergies marines désignent l'ensemble des technologies permettant de produire de l'électricité à partir des différentes forces ou ressources du milieu marin. L'énergie hydrolienne, l'énergie houlomotrice, l'énergie marémotrice, l'énergie thermique des mers et l'énergie osmotique en font partie. Elles ne sont pas toutes au même stade de développement et le marché se trouve de manière générale encore à un stade précoce. C'est pourquoi il est trop tôt pour définir les technologies et les rendements industriels de référence. De plus, le milieu marin est particulièrement exigeant et agressif, les coûts expérimentaux et en R&D pour évaluer la faisabilité des projets sont donc importants. Aussi, les réseaux électriques ne sont pas toujours adaptés à l'acheminement d'énergie marine et avant cela, des conflits d'utilisation peuvent apparaître car l'installation d'hydroliennes ou d'houlomotrices peut empêcher la pêche au chalut. L'impact écologique est également à considérer.

Les sites potentiels sont particulièrement restreints pour les énergies marémotrices et hydroliennes. C'est pourquoi les technologies houlomotrices, thermiques et osmotiques semblent plus adaptées à une utilisation dans des pays ne disposant pas de courants forts ou de grandes zones de marnage. L'énergie marine permettra notamment d'alimenter en énergie des îles ou territoires isolés disposant d'un potentiel intéressant, comme la Réunion.

Les centrales hydroélectriques, quant à elles, utilisent la pression de l'eau pour produire de l'électricité. L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2011) derrière le charbon et le gaz. La Chine, le Canada, le Brésil et les États-Unis en sont aujourd'hui les plus gros producteurs. Toutefois, la Norvège et le Brésil sont les pays où l'hydraulique a la plus grande part dans la production d'électricité : respectivement 99 % et 84 %. L'hydroélectricité fait l'objet d'investissements importants, en particulier en Asie et en Amérique latine, car il existe encore d'importantes ressources naturelles non exploitées. En Europe, les endroits propices à la construction de grands barrages sont déjà exploités à 90%. Mais les coûts de construction de barrage sont très élevés, ce qui est souvent un obstacle majeur dans des pays en voie de développement. Par exemple, sur le fleuve Congo, le projet du Grand Inga, qui pourrait alimenter en électricité toute l'Afrique centrale, est trop onéreux et les financements n'ont pas pu être réunis.

Des conséquences négatives de la construction de grands barrages existent également, sur le plan humain ou environnemental. En effet, la production hydroélectrique passe parfois par de très grands barrages qui détruisent le paysage, inondent d'importantes superficies de terre fertiles, provoquent l'évacuation sous contrainte de populations entières et peuvent, lorsqu'ils cèdent, entraîner de véritables catastrophes humaines et environnementales.

## ❖ L'éolien

L'énergie éolienne est une énergie mécanique obtenue grâce au vent, puis est utilisée soit directement, soit transformée en énergie électrique. Deux modes d'exploitation existent pour cette énergie : l'éolien terrestre, segment relativement mature, pesant plus de 95% du marché éolien, et l'éolien maritime, dit off-shore, qui en est à ses débuts mais qui est très prometteur en termes de croissance. L'exploitation cette ressource en mer convient particulièrement aux pays à forte densité de population ayant des difficultés à trouver des sites appropriés sur terre et disposant d'un espace maritime côtier conséquent et venté.

L'Europe du Nord est particulièrement bien dotée pour cela, avec des vitesses de vent supérieures à 8 m/s à 50 m de hauteur. Le Royaume-Uni est le pays disposant des plus importantes capacités éoliennes offshore (2 948 MW à fin 2012 selon l'EWEA), devant le Danemark (921 MW) et la Chine (510 MW).

On distingue aussi deux typologies d'installations : industrielle avec les grands parcs éoliens raccordés au réseau électrique et domestique avec des petites éoliennes chez les particuliers. Différents besoins peuvent donc être satisfaits.

Elle est, avec le photovoltaïque, l'une des énergies renouvelables les plus disponibles et les moins polluantes, ce sont ses principaux avantages. De plus, elle ne pose pas de problème de sécurité en matière de fluctuations des prix, à l'inverse des hydrocarbures. Les terrains où elles sont installées sont toujours exploitables par l'agriculture et les installations sont démantelables relativement facilement. Enfin, le potentiel offshore est énorme puisqu'en mer les vents rencontrent moins d'obstacles et, à puissance égale, une éolienne offshore produit deux fois plus d'électricité qu'une éolienne onshore. En revanche, elle est encore bien plus chère et son installation ainsi que son raccordement restent plus complexes.

L'énergie éolienne est intermittente, c'est ce qui constitue son plus gros inconvénient. En effet, elle dépend non seulement du fait qu'il y ait du vent ou non, mais aussi de sa force puisqu'une certaine vitesse de vent est nécessaire pour faire tourner les pales et en cas de vitesses trop importantes, le système se bloque pour éviter sa dégradation. Les éoliennes peuvent également susciter des conflits environnementaux à travers les nuisances visuelles et sonores dont elle est à l'origine, ou encore des conflits d'utilisation de l'espace.

Elle connaît un développement durable dans le monde (30% par an) et on estime qu'en 2020, elle représentera près de 5% de la consommation électrique mondiale. C'est l'Europe qui domine le marché mondial de l'énergie éolienne avec 109 GW de capacités éoliennes installées à fin 2012. Dans le monde, les Etats-Unis disposent à fin 2012 d'une puissance de près de 60 GW. En parallèle, les puissances d'Asie comme l'Inde et la Chine souhaitent développer leurs propres industries. Fin 2012, la Chine disposerait d'un parc éolien d'une puissance installée de près de 75 GW. Les experts du GWEC (Conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, devant conduire à terme à un parc susceptible de produire 3 000 TWh à l'horizon de 2020, l'équivalent de la puissance moyenne d'un réacteur nucléaire.

### ❖ L'énergie nucléaire

Les centrales nucléaires sont un moyen de production d'électricité utilisant l'énergie libérée lors des réactions de :

- fission d'un noyau très lourd comme celui de l'uranium 235,
- fusion des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium.

A la fin janvier 2015, 439 réacteurs nucléaires produisent de l'électricité dans 30 pays, dont plus d'un tiers aux États-Unis et près d'un tiers en Europe. Le principal avantage de cette énergie est qu'elle est très productrice et utilise de l'uranium que l'on peut trouver en assez grande quantité. De plus, elle ne rejette pas de CO<sub>2</sub> mais seulement de la vapeur d'eau. Elle permet aussi une production d'électricité continue puisqu'une centrale fonctionne environ 90% de l'année. Cela offre une meilleure planification électrique, contrairement aux énergies renouvelables, et une stabilité des prix, contrairement aux énergies fossiles.

Cependant, un des grands inconvénients réside dans la difficulté de la gestion des déchets nucléaires, aussi bien au niveau du transport que du stockage, car ils mettent pour certains des milliers d'années pour perdre leur radioactivité. De plus, les mesures de sécurité nécessaires dans une centrale nucléaire coûtent très cher. Ce n'est pas pour autant que le risque d'accident est nul et les conséquences peuvent s'avérer très graves comme en témoigne les accidents de Tchernobyl et Fukushima par exemple.

Globalement, il est facile de constater qu'aucune énergie décarbonée n'est parfaite. Mais il est aussi évident de voir que chacune d'entre elle présente ses propres avantages et leur utilisation est, dans tous les cas, plus judicieuse sur le long terme que celle des énergies fossiles qui sont trop polluantes et amenées à disparaître.



## II. Les mix énergétiques

*“Quand deux sages confrontent leurs idées, ils en produisent de meilleures ; le jaune et le rouge mélangés produisent une autre couleur.” Proverbe tibétain*

Chacune des sources d'énergie présentées précédemment a des avantages et inconvénients différents et existe dans des contextes économiques, géographiques, naturels et politiques très différenciés. D'où l'intérêt de disposer d'un mix énergétique diversifié. Idéalement, selon l'AIE, il faudrait disposer du mix suivant d'ici 2050 :

- 2/3 d'énergies décarbonées,
- 1/3 charbon + gaz.

A savoir aussi qu'actuellement, le mix est de 2/3 charbon + gaz et 1/3 d'énergies décarbonées.

A présent, il convient donc de résoudre le problème de la sécurité d'approvisionnement, c'est-à-dire où trouvez quoi et quand pour assurer la continuité d'alimentation ? Mais cela n'est pas si simple puisqu'il faut tenir compte des caractéristiques propres à chaque région, des interactions entre ces dernières, des caractéristiques propres à chaque technologie et enfin de la possibilité de les mettre en place à l'endroit choisi. Il n'existe donc pas un mix énergétique optimal pour une région mais plusieurs mix énergétiques pertinents.

Des études très précises peuvent être menées pour préciser au mieux ces mix, l'exercice sera fait uniquement sur la France et sur l'Europe, à titre d'exemple. Les différents potentiels en fonction des régions ont été donnés dans la partie précédente.

### ❖ En Europe

Ici, des cycles annuels normalisés de production d'énergie éolienne et solaire ainsi que la consommation ont été tracés pour l'Europe (Heide D, et al., 2010) :

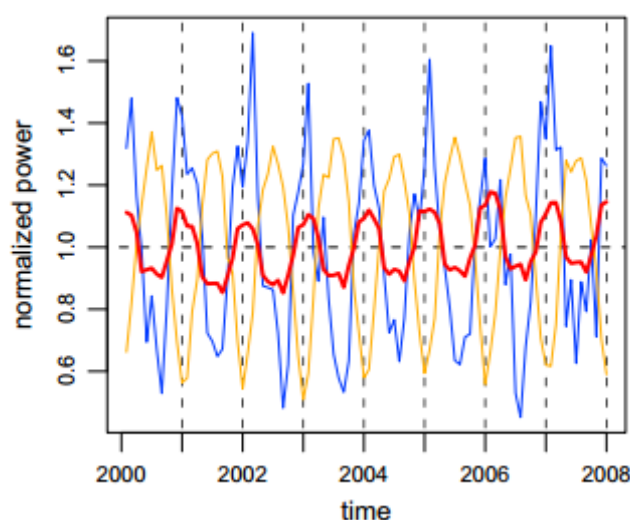


Figure 3 : Cycles de production normalisés d'énergie éolienne (bleu), solaire (orange) et de la consommation (rouge) en Europe.

Il apparaît de manière claire que les productions solaire et éolienne sont saisonnières avec une production solaire importante l'été et faible en hiver et exactement l'inverse pour la production éolienne. Les deux productions sont donc anticorrélées.

Il serait donc très intéressant de combiner les deux puisque lorsque l'une des deux est disponible l'autre ne l'ai pas et vice-versa. Les coûts de stockage de l'énergie seraient alors limités. A noter aussi que, en comparaison avec la production d'énergie solaire, la production d'énergie éolienne est beaucoup plus corrélée avec la demande.

Pour aller plus loin, il faudrait faire cette étude pour plusieurs régions européennes car au sein de chaque région, les ressources ne sont pas disponibles de la même manière. On sait par exemple que la variabilité de production solaire est plus faible dans les régions du Sud en comparaison aux régions du Nord et que le vent souffle davantage dans les régions océaniques.

### ❖ En France

A l'échelle d'un pays comme la France, un exemple de mix « idéal » a été imaginé par l'ADEME :

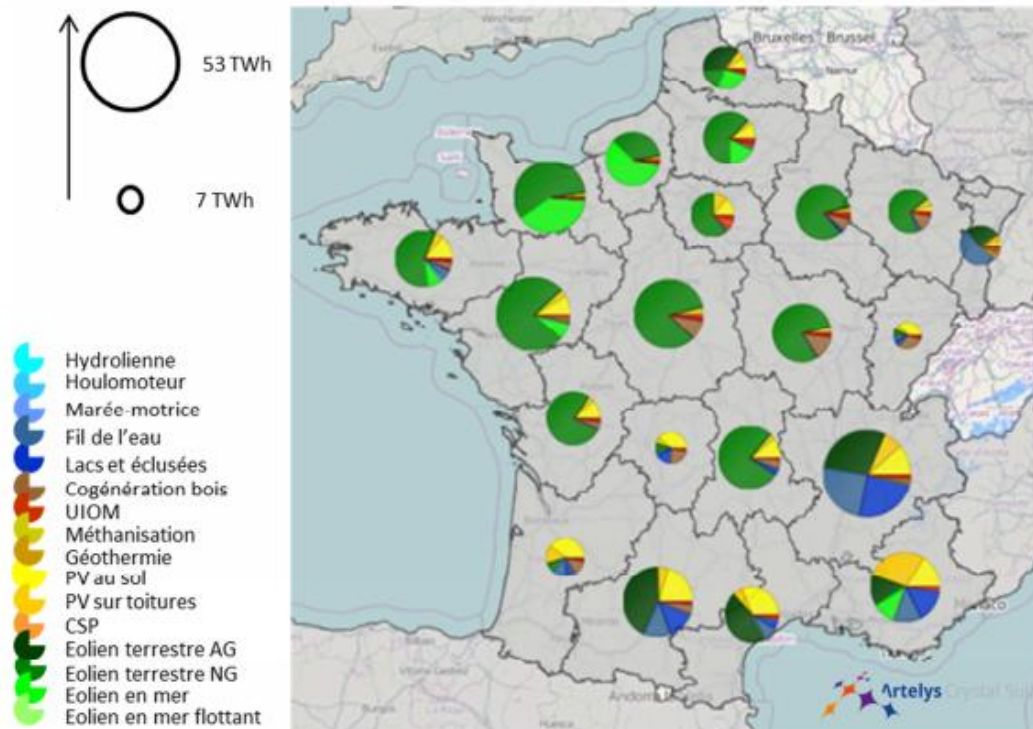


Figure 4 : Production par filière et par région - Source : ADEME

A nouveau, la différence de potentiel en fonction des régions est mise en évidence avec globalement une domination de l'énergie éolienne au Nord et au Nord-Ouest. En revanche, le Sud a une part plus importante d'énergie hydraulique et solaire. Ce type d'étude est donc pertinent puisqu'il met en évidence l'éventail entier des ressources disponibles et donc les différents mix possibles.

### III. La gestion des énergies

*"Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible." Antoine de Saint-Exupéry*

Dans la partie précédente ont été exposés différents mix énergétiques et tendances qu'il serait intéressant d'envisager pour les années à venir. Cependant comment, concrètement, peut-on utiliser ces énergies ?

Si les énergies évoquées deviennent disponibles dans les quantités espérées, différentes évolutions seraient nécessaires dans plusieurs secteurs afin de les utiliser de manière optimale. Il est donc crucial de se soucier de l'efficacité énergétique et de l'améliorer.

### ❖ Le bâtiment

Dans beaucoup de pays, le rendement énergétique des nouveaux bâtiments pourrait être augmenté de plus de 70% par rapport à celui des bâtiments existants. Il existe par exemple aujourd'hui des fenêtres au pouvoir d'isolation trois fois plus élevé que celui des modèles antérieurs, des chaudières modernes au gaz ou au fioul atteignant un rendement de 95 % et des climatiseurs performants qui consomment de 30 % à 40 % moins d'énergie que les modèles d'il y a dix ans. Les dispositifs avancés d'éclairage autorisent, quant à eux, des économies d'énergie comprises entre 30 % et 60 %. Aussi, tant le chauffage urbain que les pompes à chaleur et l'énergie solaire permettent d'économiser de l'énergie, si bien que les maisons pourraient fonctionner en autonomie et devenir « passives ».

### ❖ L'industrie

Dans ce domaine, il existe aussi un énorme potentiel de réduction de la demande d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> à la faveur de l'amélioration du rendement des moteurs, pompes, chaudières et systèmes de chauffe. Tout cela en récupérant l'énergie dans les procédés de production, en développant le recyclage ou encore en adoptant de nouveaux procédés, des matériaux plus évolués.

### ❖ Les transports

Dans le domaine des transports, l'efficacité énergétique est également primordiale, car ce secteur consomme la majeure partie des produits pétroliers. Or, des technologies prometteuses existent, notamment avec les véhicules hybrides et les motorisations diesel avancées. L'emploi de nouveaux matériaux et de moteurs plus compacts permet aussi d'alléger les véhicules, qui consomment alors moins de carburant.

De plus, l'éthanol produit à partir de matières végétales est un carburant intéressant qui présente de bonnes propriétés de combustion. Le plus souvent, il est mélangé à de l'essence.

Enfin, l'utilisation, dans les véhicules à pile à combustible, d'hydrogène provenant de sources faiblement ou non carbonées pourrait pratiquement décarboner le secteur des transports à long terme. Le passage à l'hydrogène exigera cependant d'énormes investissements d'infrastructure. En effet, en dépit des progrès spectaculaires récemment accomplis dans ce domaine, c'est une technologie encore très onéreuse.

### ❖ Le captage stockage du CO<sub>2</sub> et sa valorisation

La technologie de captation et de stockage du CO<sub>2</sub> (CSC) peut faire nettement diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production d'électricité, à l'activité industrielle et à l'élaboration de carburants de synthèse. Elle permettrait aussi de réduire presque à néant les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de l'utilisation de charbon et de gaz naturel dans ces secteurs. Le coût de la CSC est élevé, mais il est amené à diminuer.

La filière du captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CSC) et de sa valorisation couvre l'extraction du dioxyde de carbone des installations fortement émettrices, sa purification et compression, son transport vers des sites de stockage et son injection de façon définitive et sûre dans des formations géologiques adaptées. Au lieu d'être stocké, le CO<sub>2</sub> peut également être valorisé en tant que matière première dans des procédés industriels. C'est donc une technologie qui s'avèrera nécessaire.

Enfin, laissons place à un peu de fantaisie avec deux belles innovations qui pourraient, sait-on jamais, révolutionner l'urbanisme.

### ❖ Arbre à vent



Figure 5 : Arbre à vent à Pleumeur-Bodou (Côtes d'Armor)

La start up NewWind a mis au point belle invention qui s'intègre harmonieusement dans tout type d'environnement. Il s'agit d'un système de production d'électricité en forme d'arbre avec un tronc en acier et des feuilles tournantes agissant comme des mini éoliennes. Cet arbre est capable d'exploiter tous les types de vent sur 360°, turbulents et laminaires, en milieu urbain et en milieu naturel. Les mini-turbines à générateur intégré, disposées en quinconce, tournent dès que le vent atteint 2 mètres/seconde contre 4 mètres/seconde pour des éoliennes classiques, augmentant le nombre de jours où l'arbre peut produire de l'électricité. Sa puissance est évaluée entre 2,5 et 3,5 kWh. L'objectif est d'utiliser les courants d'air circulant en ville, réputées difficiles à capter, pour alimenter par exemple des lampadaires à LEDs, des bornes de recharge de voitures ou même des foyers.

A son design élégant s'ajoute sa discrétion puisqu'aucun câble ou générateur n'est apparent et son fonctionnement à axe vertical supprime la pollution sonore des éoliennes traditionnelles.

A ce jour, son coût (29 500€ HT) le rend difficile d'accès aux particuliers mais une vingtaine d'arbres ont déjà été prévendus. Et la société planche déjà sur l'arbre idéal composé d'un tronc en bois et de feuilles en fibres naturelles : les feuilles récupérerait l'énergie du vent, ses racines l'énergie géothermique et son écorce, couverte de cellules de Grätzel photosensibles l'énergie lumineuse.

### ❖ Avatar

Continuons dans la fantaisie avec un projet un peu fou, "Glowing Plants", réalisé par des scientifiques de l'université de Cambridge, qui vise à rendre les plantes bioluminescentes. Et ils ont réussi! Comment? En injectant des gènes issus de l'ADN d'animaux possédant la capacité biologique naturelle d'émettre de la lumière, comme les lucioles à des végétaux qui n'en sont pas naturellement dotés. L'idée est de fournir une alternative "naturelle" à l'éclairage électrique et à long terme, l'objectif est remplacer le parc d'éclairage actuel.



Figure 6 : Plante bioluminescente

### ❖ Smart Grids

Pour faire face aux mutations du paysage énergétique, il est nécessaire de moderniser le système électrique. C'est pourquoi il est intéressant de privilégier le déploiement des technologies de Smart Grids plutôt que le remplacement et le renforcement massif des réseaux.

L'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication aux réseaux les rendra communicants et permettra un pilotage du réseau plus flexible pour gérer les contraintes liées à l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique. Ces contraintes auront également pour effet de faire évoluer le système actuel vers un système où l'ajustement se fera davantage par la demande, faisant du consommateur un véritable acteur.

### ❖ Bilan

Ci-dessous se trouve un schéma type qui pourrait représenter le réseau intelligent d'une ville utilisant les technologies associées aux énergies décarbonées évoquées tout au long de l'exposé.

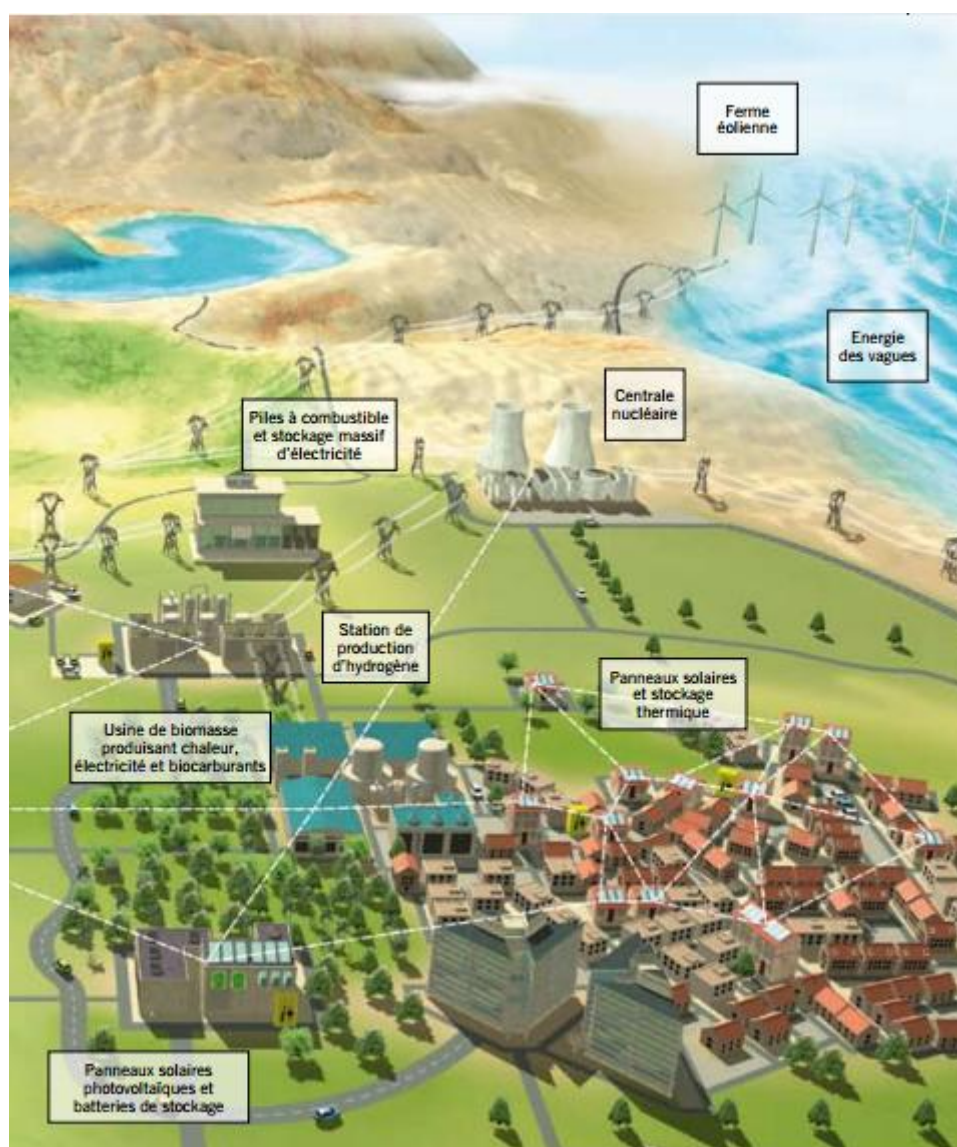


Figure 7 : Schéma d'une ville présentant un mix énergétique décarboné – Source : CEA



#### IV. L'aspect politico-économique

*“Je crois que l’avenir de l’humanité est dans le progrès de la raison par la science.”  
Emile Zola*

Il a été montré que l'innovation dans le domaine des technologies est essentielle dans la lutte contre le changement climatique et dans le mouvement vers la transition énergétique. Cependant, la dépendance aux combustibles fossiles persiste et les tendances récentes avec les fluctuations imprévues des marchés de l'énergie complexifient la situation. Cela met en évidence l'importance de l'action des gouvernements pour accélérer la transition aux échelles individuelle et collective. Ainsi, tous les pays doivent aujourd'hui faire face à des enjeux d'investissements massifs dans l'énergie, qu'il s'agisse de production, de transport, ou d'efficacité.

Les différentes énergies ne peuvent obéir à des logiques de développement séparées mais doivent au contraire faire l'objet d'une stratégie énergétique globale. La partie délicate ne réside alors pas dans les idées mais dans la mise en place à l'échelle mondiale des solutions. Il reste maintenant à attendre que toutes les technologies en place et en attente soient « débloquées » grâce au « progrès de la raison » des gouvernements et de leurs lobbies, par la science.

### CONCLUSION

Ainsi, le développement des énergies décarbonées s'impose naturellement en raison de l'épuisement des ressources fossiles et de leur pollution trop importante. Ce développement est possible pour répondre aux enjeux de développement économique, de sécurité d'approvisionnement et de préservation du climat d'ici 2050. Pour cela, il sera nécessaire de déployer massivement les technologies déjà compétitives et de réaliser les investissements en R&D pour développer les énergies futures, globalement trop coûteuses encore aujourd'hui. Pour répondre aux besoins, toutes les technologies, y compris les plus fantasques, seront nécessaires et feront partie du mix énergétique mondial.