

# Les principales sources d'énergie

Caractéristiques techniques générales (C.Chambu, janvier 2018)

## Vue d'ensemble

Ce document est une description factuelle des sources d'énergie, essentiellement en France. Par principales sources d'énergie on entend les sources actuelles, mais également certaines émergentes, éolien, solaire et agricole. La présentation est dite technique car, mis à part pour l'électricité en France, l'économie n'est pas abordée ; et par technique il faut comprendre la description très générale des caractéristiques actuelles et une ébauche de prévision de leur futur.

En introduction, on présente les consommations mondiales en énergie primaire. Comme ses voisins européens, un français consomme en moyenne 12 litres d'équivalent pétrole par jour, essentiellement pour le chauffage et le transport, alors que sa nourriture n'en exigerait que 0,2. La France se distingue par contre par l'abandon du charbon et la plus forte proportion mondiale, environ un tiers, d'énergie d'origine nucléaire.

Le charbon est peu examiné ; ses réserves sont dites de deux siècles mais son utilisation a pratiquement cessé en France.

En ce qui concerne le pétrole et le gaz une consommation mondiale stagnante ou croissante selon les pays et un taux de découverte en diminution conduisent inexorablement vers une disparition que les évolutions technologiques (on présente l'exploitation des hydrocarbures dits « de schiste ») retardent sans cesse.

L'organisation française de l'électronucléaire est détaillée. Le futur de cette technologie a été perturbé par l'accident de Fukushima et la mise en œuvre de la stratégie française qui reposait sur une évolution des réacteurs vers les surgénérateurs semble en suspend. Par ailleurs un problème important reste à résoudre : la radioactivité du combustible usé se poursuivra pendant plusieurs centaines de milliers d'années; son stockage à cette échelle de temps est sans commune mesure avec celle des garanties industrielles habituelles et il est toujours au stade de l'étude.

Parmi les énergies renouvelables on détaille les sources solaire, éolienne et agricole sans insister sur l'hydraulique et la forestière :

### ❖ L'énergie solaire :

L'ensoleillement du pays n'est que moyen et sa variation soit quotidienne, jour et nuit, soit annuelle, été et hiver, voire son absence par ciels nuageux rend son utilisation aléatoire.

Les procédés photovoltaïque et thermoélectrique de production d'électricité sont analysés, en particulier leurs niveaux de rendement qui nécessitent de grandes surfaces d'exploitation et le difficile stockage de leur production électrique, rendu obligatoire par la variabilité de l'ensoleillement, qui n'a pas actuellement de solution satisfaisante.

La récupération de l'énergie solaire peut aussi être thermique et mise en œuvre avec une technologie élémentaire au niveau habitat individuel pour délivrer de l'eau domestique vers 60°C et soulager en partie l'utilisation de l'équipement traditionnel.

❖ L'énergie éolienne :

Le vent est d'un niveau très moyen dans le pays mais ses variations sont moins contraignantes que celles de l'ensoleillement car il ne dépend pas de l'alternance jour-nuit et il est plutôt plus important l'hiver lorsqu'arrive le surplus de consommation électrique dû au chauffage. Par contre, son utilisation est critiquée pour les modifications du paysage par les éoliennes.

❖ Les agro-carburants :

L'éthanol est additionné aux essences. Il provient de la fermentation de sucres purs ou combinés contenus dans les betteraves, le maïs, le blé ou les pommes de terre. Le rendement énergétique du système, rapport entre l'énergie de combustion de l'éthanol et l'énergie nécessaire à sa production (culture et fermentation), est sujet à discussions.

Le diester est additionné au gazole. Il provient d'une transformation chimique de graisses contenues dans des graines d'oléagineux, essentiellement le colza.

Ces deux agro-carburants nécessitent des surfaces de culture importantes qui sont donc à mettre en balance avec leur utilisation pour de la nourriture.

En conclusion de cet examen factuel, on ne voit pas très bien en l'état présent des techniques d'exploitation des énergies renouvelables comment elles pourraient permettre un simple « remplacement standard » des sources actuelles dont il convient donc de prolonger la durée de vie par leur amélioration et leur usage raisonnable

### Préambule sur les unités

Les unités sont différentes selon les énergies et dans un souci de simplification, on a fait le choix d'exprimer si possible les différentes énergies en tonne ou litre d'équivalent pétrole, tep ou lep, et de garder les unités électriques : pour les puissances, kW, MW, GW, TW (pour kilo, méga, giga, téra Watt) et idem pour les productions, kWh, MWh, GWh, TWh ; sachant que 1 tep vaut ~10 MWh et donc 1lep vaut ~10kWh.

De manière générale : k = mille, M= million, G = milliard, T = mille milliards

l = litre, q = quintal, ha = hectare, a = année

## 1. Les consommations en énergies primaires selon leurs sources

La consommation en énergie est très variable selon les pays (Fig.1). Dans les pays européens de niveau économique semblable à la France la consommation par habitant est annuellement voisine de 4 tep (soit 12 lep par jour). Suite à la prise de conscience de la finitude des ressources d'origine fossile elle est actuellement stable, voire en légère diminution dans ces pays. Par contre elle est en forte croissance dans les pays comme la Chine qui accèdent à un nouveau mode de vie.

<b>Afrique</b> : 0,6	<b>Inde</b> : 0,6
<b>Monde</b> : 1,9	<b>Chine</b> : 2
<b>France</b> : 3,9	<b>Allem.:</b> 4,3
<b>USA</b> : 7	<b>Lux.</b> : 8
<b>Qatar</b> : 18	

**Fig.1 : énergie primaire par habitant (tep/an,IEA-2014)**

Au niveau mondial (Fig-2), les sources d'énergie sont essentiellement les trois sources d'énergie fossile que sont le charbon, le pétrole et le gaz. La forte proportion des « autres renouvelables » (autres que l'hydraulique) est due au bois, l'éolien et le solaire étant encore marginaux.

La France se distingue sur plusieurs points : la quasi disparition du charbon, la faiblesse du gaz, la forte proportion de l'hydraulique (mais il est considéré que son potentiel est épuisé) et surtout la très grande importance du nucléaire qui fournit environ les trois quarts de l'électricité.

<b>Pays</b>	<b>char</b>	<b>pétr</b>	<b>gaz</b>	<b>nucl</b>	<b>hydr</b>	<b>autres renouv</b>
<b>Monde %</b>	28,9	31,1	21,4	4,8	2,4	11,4
<b>France %</b>	4,2	31	14,8	35,6	5,7	9
<b>Réserves ans?</b>	200	40+?	60+?	200		

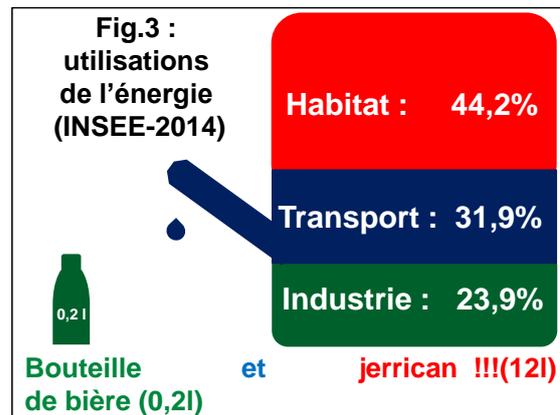
### Fig.2 : Sources d'énergie primaire

(Monde : 1351 Mtep/a - IEA-2014,  
France : 256 Mtep/a - INSEE-2015)

Il est très délicat de citer des chiffres pour les ressources tant ce sujet prête à controverse, ceux de la Fig-2 figurent donc avec des ? mais ils sont généralement considérés comme raisonnables. Les ? des deux hydrocarbures correspondent en plus aux ajouts possibles au pétrole et au gaz dits « de schiste ».

## 2. Les consommations en énergies primaires selon leurs utilisations

Lorsqu'ils ne font pas d'efforts particuliers, il est généralement conseillé aux français de prendre des repas qui contiennent une valeur énergétique quotidienne d'environ 2.000 kilocalories, dans nos unités ceci correspond à 0,2 lep (litre d'équivalent pétrole qu'il ne s'agit pas d'avaler !). Ce « volume énergétique » que nécessite notre vie physique est donc bien inférieur au volume de 12 litres de la consommation quotidienne moyenne d'un français (Fig-3). En fait les deux utilisations principales correspondent à notre mode de vie puisque 44% vont dans l'habitat et 32% dans les transports.



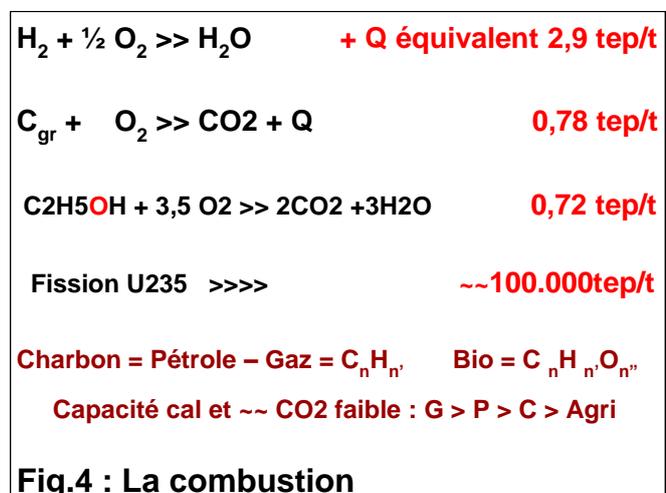
Dans l'habitat c'est essentiellement le chauffage qui est consommateur. Sans se priver de confort le remède est en priorité l'isolation pour laquelle des solutions techniques existent déjà, mais il faut bien admettre qu'elles sont plus faciles à mettre en œuvre dans l'habitat en construction que dans l'habitat existant.

Dans le transport la diminution des consommations est compensée par l'augmentation du parc et certaines solutions proposées sont surprenantes : la voiture à électricité ou à hydrogène nécessitent bien entendu de fabriquer ces deux « carburants »....

## 3. Les énergies fossiles : charbon, pétrole, gaz

L'énergie de ces sources est leur chaleur de combustion qui est chimiquement illustrée sur la Fig.4. Du point de vue valeur énergétique et émission de CO2 à l'échelle moléculaire les performances décroissent de l'hydrogène H2 au carbone C et à l'alcool C2H5OH. Compte tenu de leur composition, ceci classe les carburants d'origine fossile dans l'ordre : Gaz >>> Pétrole >>> Charbon et produits agricoles. On peut par ailleurs mettre en regard de la combustion la fission de l'uranium.

Le charbon présente de plus l'inconvénient d'être un solide ce qui d'une part le rend à peu près impossible



à purifier alors qu'il contient toujours du Soufre et des métaux lourds et d'autre part génère des poussières lors de sa combustion. Sa production pose aussi de nombreux problèmes mais à son crédit, ses réserves seraient de l'ordre de 200 ans.

A l'opposé le gaz, qui est en fait du méthane  $\text{CH}_4$ , a tous les avantages tant en ce qui concerne sa récupération du gisement (c'est un gaz) que sa richesse en hydrogène ou sa propreté à la combustion.

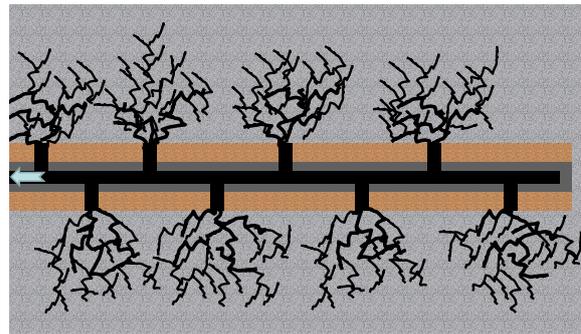
Le pétrole est en position intermédiaire. Si la limite des ressources ne peut pas être remise en question avec un taux de découverte qui décroît et une production qui est pratiquement constante sa date est constamment repoussée par les évolutions technologiques : forages déviés, profonds ou en eau profonde, récupération améliorée par injection d'eau éventuellement rendue plus visqueuse par ajout de polymères pour mieux balayer le gisement (éviter les digitations de l'eau dans l'huile) voire additionnée d'agents tensioactif pour mieux mobiliser l'huile (diminution de la tension inter-faciale eau-huile).

Les ressources en gaz et pétrole peuvent également être augmentées par les gisements dits de schiste. On devrait dire de roche mère car ces gisements sont si peu poreux que l'hydrocarbure est resté dans sa roche mère. Leur exploitation est actuellement possible en utilisant deux techniques (Fig.5) :

- ° le forage horizontal qui permet de suivre le gisement sur plus de deux kilomètres

- ° la fracturation hydraulique par de l'eau à plusieurs centaines de bars qui crée une micro porosité sur un rayon d'environ 100 mètres. L'eau de fracturation, environ  $20.000\text{m}^3$ , par puits contient de l'ordre de 9,5% de

sable qui maintiendra les fissures ouvertes et 0,5% d'additifs divers qui, si cette eau n'est pas recyclée devront être retirés avant son rejet. La période d'exploitation d'un puits est plus courte que traditionnellement, de l'ordre de trois ans, et se fait avec des installations qui pourront être facilement démontées.

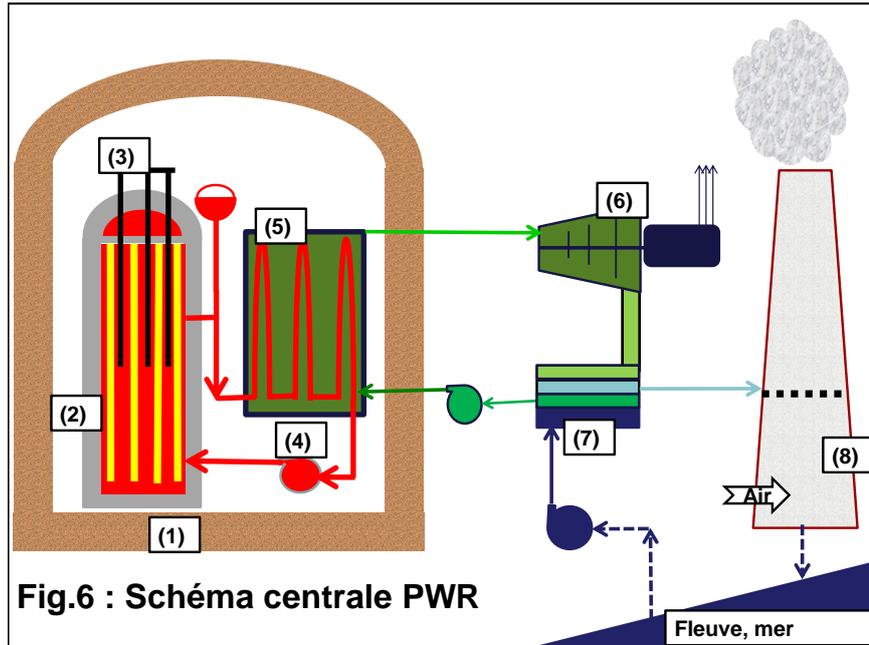


**Fig.5 : Production de gaz après forage horizontal et fracturation hydraulique !!!**

#### 4 : L'électronucléaire français

Actuellement la France produit environ 75% de son électricité à partir de 58 réacteurs nucléaires de la technologie PWR (pressurized water reactor) de fission d'uranium enrichi à 3,5% en son isotope 235. Ce niveau d'emploi du nucléaire est singulier et les réserves d'uranium, 200 ans selon la Fig.2, deviendraient bien inférieures à celles du pétrole si ce niveau se généralisait au monde. Une autre originalité française est le retraitement du combustible usé pour récupérer le plutonium et l'utiliser comme combustible car certains de ses isotopes ont les propriétés de fission de U235.

La Fig.6 est un schéma d'une centrale française d'une puissance de 900MW (mégawatt). Un bâtiment en béton (1) de plusieurs mètres d'épaisseur isole la partie nucléaire : cuve d'acier (2) cylindrique, 12x4m et 20cm d'épaisseur, avec les barres de combustible (dorées) et des barres mobiles de régulation (3) immergées dans de l'eau (rouge). La fission

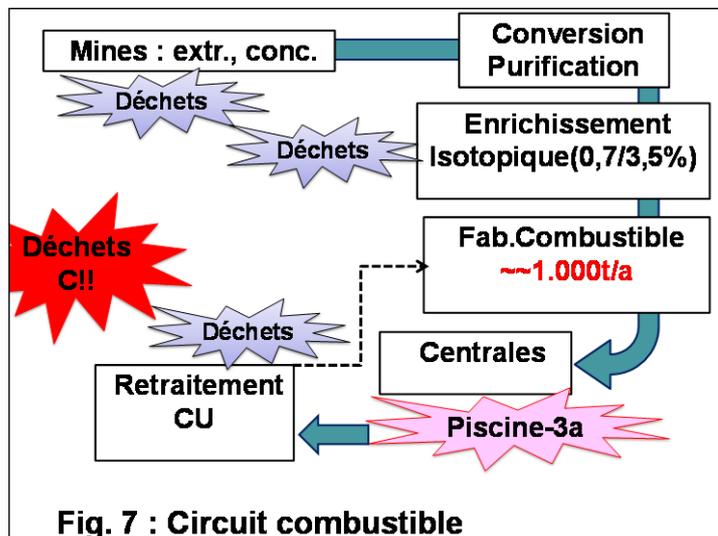


**Fig.6 : Schéma centrale PWR**

d'un atome de U235 crée deux produits de fission et libère en moyenne 2,5 neutrons qui vont chauffer l'eau et provoquer d'autres fissions ; réaction en chaîne qui est contrôlée par les barres de régulation qui contiennent un absorbeur de neutrons. L'eau « rouge » du circuit (4) qui traverse le réacteur nucléaire ne sort pas du bâtiment de confinement ; portée vers 320°C, elle traverse un échangeur de température [(5), (il y en a trois)] où elle produit de la vapeur (150 bar, 290°C, circuit vert) qui alimente un turboalternateur (6) puis est condensée (7) avant d'être recyclée dans l'échangeur (5). Le condenseur (7) est refroidi par de l'eau en provenance d'un fleuve ou de la mer, cette eau réchauffée est à son tour refroidie dans un aéroréfrigérant, immense tour dont s'échappe un petit nuage de vapeur d'eau.

La fabrication et le retraitement du combustible nécessitent toute une série d'opérations industrielles (Fig.7). Les mines sont

actuellement au Niger et au Canada et la France reçoit un oxyde d'uranium, le « yellow cake ». Cet oxyde est converti en hexafluorure UF<sub>6</sub>, seul dérivé de l'uranium qui est gazeux mais seulement à partir de 60°C, pour être purifié puis enrichi en isotope 235 de 0,7% à 3,5%. Enfin l'uranium est de nouveau mis sous forme d'oxyde puis pastillé en sa forme définitive de combustible de 1.000t/a d'équivalent uranium.



**Fig. 7 : Circuit combustible**

Chaque année 1/3 du combustible utilisé de chaque centrale est remplacé par du combustible neuf ; soit ~21t d'uranium pour une centrale de 900MW. Ce combustible est à la fois trop chaud et trop radioactif pour être transporté et il est entreposé dans des piscines de « refroidissement ». Après 3 ans la radioactivité est tombée d'un facteur 10.000 et le combustible est transporté à l'usine de retraitement de La Hague où, après un séjour en piscine, il est séparé en trois fractions : l'uranium non utilisé et le plutonium qui seront recyclés en combustibles et les produits de fission.

Cette dernière fraction est incinérée, puis les cendres sont vitrifiées et coulées dans des containers métalliques pour entreposage dans des puits ventilés sur le site en attente d'une solution de stockage (le volume cumulé de ces « déchets C » est de l'ordre de 3.500m<sup>3</sup>).

L'industrie du combustible génère des déchets aux différents niveaux de la production comme l'indique la Fig.7. Le problème de leur radioactivité se pose de manière aiguë sur le combustible utilisé. La radioactivité initiale du déchargement annuel d'une seule centrale est de plusieurs milliers de fois celle dégagée lors de l'explosion de la bombe d'Hiroshima. Il en est de même des déchets C de La Hague et elle sera encore importante dans des centaines de milliers d'années.

Le problème que pose le stockage dit « définitif » des « déchets C » n'est donc pas résolu ; une solution de stockage souterrain à une profondeur de 500m dans des couches d'argile est en cours d'étude dans une installation pilote sur le site de Bure (Meuse).

En ce qui concerne la stratégie française, citons simplement pour information ce qu'elle était annoncée avant l'accident de Fukushima :

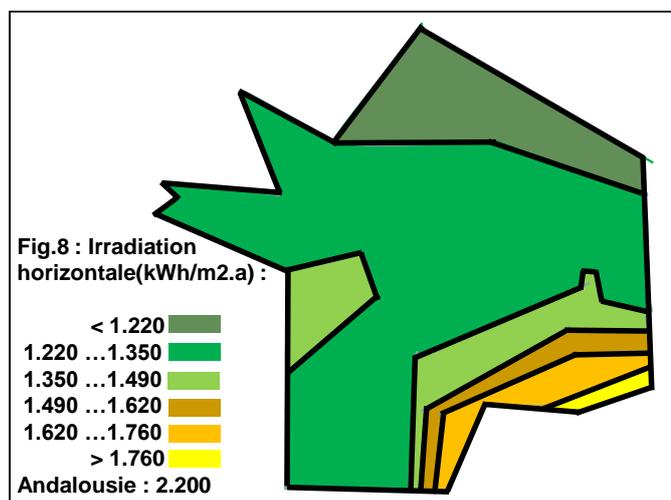
- Jusqu'en 2040 mise au point de la technologie des surgénérateurs (technologie des neutrons rapides, réacteur pilote « Viking ») et si besoin construction des nouvelles centrales selon la technologie EPR (PWR améliorée).
- Après 2040 construction de centrales surgénératrices et « incinération » des déchets par des centrales de ce type (volume réduit mais radioactivité accrue).

## 5 : Les énergies renouvelables

On va successivement commenter l'énergie solaire et éolienne (qui ont respectivement contribué à 1,6% et 3,9% de la production électrique française en 2016), puis les agro-carburants (~5% de la consommation française 2016). On peut remarquer qu'en fait l'origine de l'énergie est toujours solaire.

### 5.1 : L'énergie solaire

La Fig.8 représente la répartition de

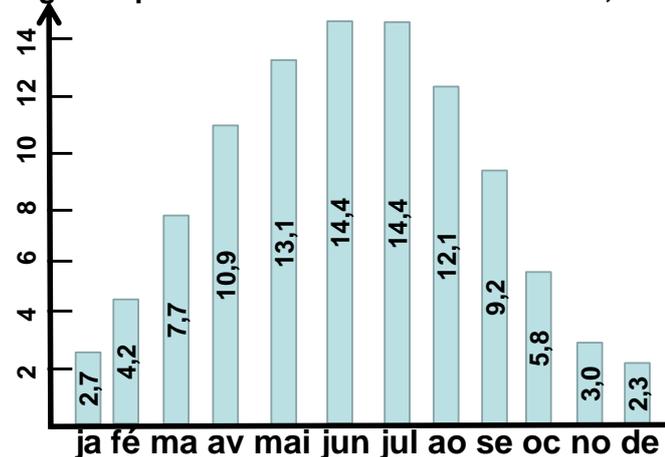


l'irradiation solaire en France. Les valeurs sont assez faibles sur la majorité du territoire ;

elles sont, par exemple, à comparer à celle de l'Andalousie, région d'importantes fermes solaires. Pour une production électrique il faut également prendre en compte la variation de l'irradiation quotidienne et annuelle (Fig.9).

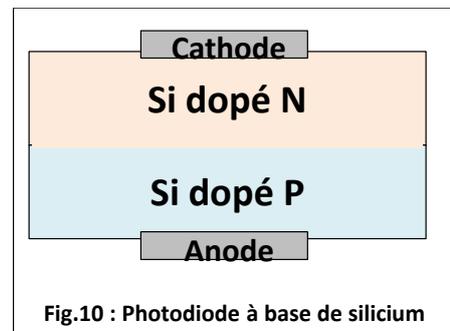
L'énergie de cette irradiation peut être récupérée de trois façons : pour faire de l'électricité soit directement par effet photoélectrique, soit thermiquement en vaporisant de l'eau pour entrainer un turboalternateur, ou pour faire de l'eau chaude à usage domestique.

**Fig.9 : répartition de l'irradiation en France, %**



### 5.1.1 : L'énergie solaire photoélectrique

L'électricité étant un courant d'électrons, on peut la produire directement lorsque le rayonnement solaire peut arracher des électrons à une matière et qu'ils vont en être extraits par un dispositif électronique. Il y a plusieurs manières de procéder mais la seule industrialisée est à base de diodes faites par la technologie de microélectronique avec du silicium poly-cristallin convenablement dopé (Fig.10). Le rendement entre l'énergie électrique obtenue et celle de l'irradiation a évolué à partir de 10% et semble tendre lentement vers 15%.



**Fig.10 : Photodiode à base de silicium**

Deux réalisations :

\* 16m<sup>2</sup> sur un toit dans le sud-ouest avec un ensoleillement de 1350kW/m<sup>2</sup>.a produisent 2.542 kWh/a ce qui fait un rendement de 11,8%. L'extrapolation pour la production française 2016 des 531 TWh nécessiterait une surface de toit de 3.340 km<sup>2</sup> ou une surface au sol de parcs solaires multipliée par 4 pour permettre l'exploitation (circulation de véhicules, ..) de 13.360 km<sup>2</sup> (surface moyenne d'un département : 5.666 km<sup>2</sup>).

\*EDF annonce pour 2016 une production solaire de 8,5 TWh et un taux de marche de 14 %. Si on suppose un ensoleillement moyen de 1.300kWh/m<sup>2</sup>.a, et en assimilant le taux de marche au rendement ceci nécessite une surface de capteurs de 46,7 km<sup>2</sup> donc une surface totale (facteur 4) de 186,7 km<sup>2</sup>. L'extrapolation pour la production française 2016 des 531 TWh nécessiterait une surface au sol de 11.664 km<sup>2</sup>.

### 5.1.2 : L'énergie solaire thermoélectrique

Dans une première variante de cette technologie des champs de miroirs plans renvoient le rayonnement sur une chaudière, située en haut d'une tour, où circule un sel fondu qui est porté vers 400°C. Le circuit de sel se prolonge en boucle dans un stockage isolé thermiquement puis dans un échangeur thermique où de l'eau est vaporisée pour alimenter un turboalternateur.

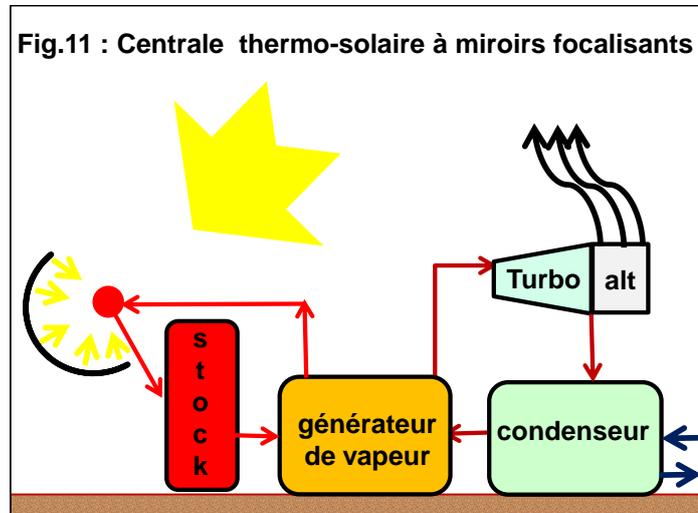
Dans une seconde variante (Fig.11) les miroirs sont cylindrico-paraboliques et le sel fondu circule au foyer des miroirs.

Dans les deux cas le volume du stockage est prévu pour permettre de fonctionner la nuit.

**Une réalisation :** En Andalousie avec un ensoleillement de 2.200 kWh/m<sup>2</sup> .a

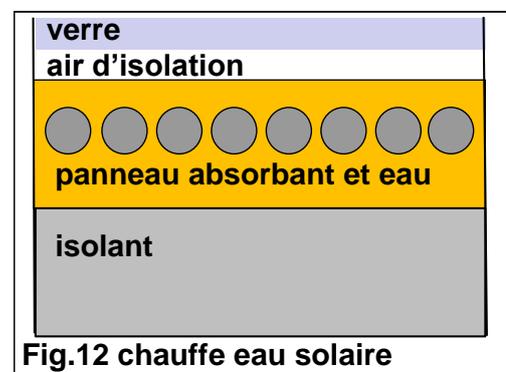
et à 1.100 m d'altitude (eau froide) la centrale Andasol-1 est équipée de 510.000 m<sup>2</sup> de miroirs sur 2 km<sup>2</sup>. Annoncée pour une puissance de 50MW, elle produit 165 GWh/an pour un cout de 271 € par MWh. Son stockage de sels fondus lui donne une autonomie de 7,5 heures. Le rendement est de 14,7% par rapport à l'énergie reçue sur les miroirs ; mais il est quatre fois moindre, 3,67%, par rapport à la surface totale.

L'extrapolation pour la production française 2016 des 531 TWh nécessiterait une surface au sol de 10.892 km<sup>2</sup> avec un ensoleillement de 1300 kWh/m<sup>2</sup>.a.



### 5.1.3 : L'énergie photo-thermique

Un panneau absorbant le rayonnement (Fig.12) est parcouru par de l'eau du réseau qui est chauffée puis stockée. Ce chauffe eau solaire est de construction aisée et peu coûteuse, il peut être installé en terrasse. Si à Toulouse, par exemple, on veut disposer quotidiennement d'un stockage de 200 litres d'eau à 60°C ; un panneau de 6m<sup>2</sup>, incliné à 45 degrés vers le sud, peut fournir 100% de l'énergie nécessaire en juillet et août mais seulement 13 et 17% en décembre et janvier.



## 5.1.4 : Le futur de l'énergie électrique solaire

### 5.1.4.1 : Le stockage de l'énergie électrique

Les variations de l'irradiation solaire rendent le stockage de l'électricité produite à partir de cette source absolument obligatoire. De nombreuses solutions ont été envisagées : par gravité (remonter de l'eau en altitude), inertie (volant d'inertie), chimique (batterie, pile à hydrogène)...Mais la plus facile d'utilisation reste actuellement la batterie ; et compte tenu des considérations économiques, la batterie au plomb. La Fig.13 représente le poids d'une batterie pour stocker l'énergie équivalente à 1 litre d'équivalent pétrole (lep).

Pb acide	250
Ni-Cd	160
Ni-MH	100
Li ion	60
Li métal	45

**Fig.13 : Capacité des batteries (kg/lep)**

### 5.1.4.2 : Les surfaces nécessaires

La surface d'une centrale solaire comprend d'une part la surface des capteurs et d'autre part la surface au sol nécessaire à leur entretien. Sur Andrasol-1 la surface totale est 4 fois la surface des capteurs, par ailleurs c'est à peu près le résultat qu'on trouve pour qu'un petit véhicule puisse circuler entre les rangées de capteurs ; on a donc adopté ce rapport pour les calculs qui suivent.

La fig.14 présente les résultats d'un calcul élémentaire qui donne la surface totale nécessaire pour produire annuellement la totalité de l'électricité française (531 TWh sinon faire une règle de trois) en fonction de l'irradiation solaire et du rendement entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue sur les capteurs. En ce qui concerne les rendements ils encadrent à la fois le photo-solaire du silicium poly-cristallin et le thermo-solaire (14,7% pour Andrasol-1).

Ces surfaces sont à rapprocher de la surface moyenne d'un département métropolitain qui est de 5.666 km<sup>2</sup>.

<département> = 5.666 km <sup>2</sup>		Irradiation (kWh/m <sup>2</sup> .a)		
		1100	1300	1500
R e n d e m e n t %	10	19.310	16.339	14.161
	12	16.090	13.616	11.800
	14	13.793	11.671	10.115
	16	12.069	10.212	8.850

**Fig.14 : Surface (km<sup>2</sup> au sol) pour produire en photosolaire l'électricité française (531 TWh/a)**

<b>Production</b> Eolien off shore:175 Solaire en parc:142 Eolien on shore:82 Gaz:85 Nucléaire:49 Hydraulique:17	<b>Achat</b> Solaire parc:150 Eolien parc:80 Solaire particulier (<9kWc):235
<b>Vente particulier (&lt;9kVA):147</b> <b>Nucléaire: 42</b>	
€/MWh	

**Fig.15 : Coûts et prix – EDF 2016**

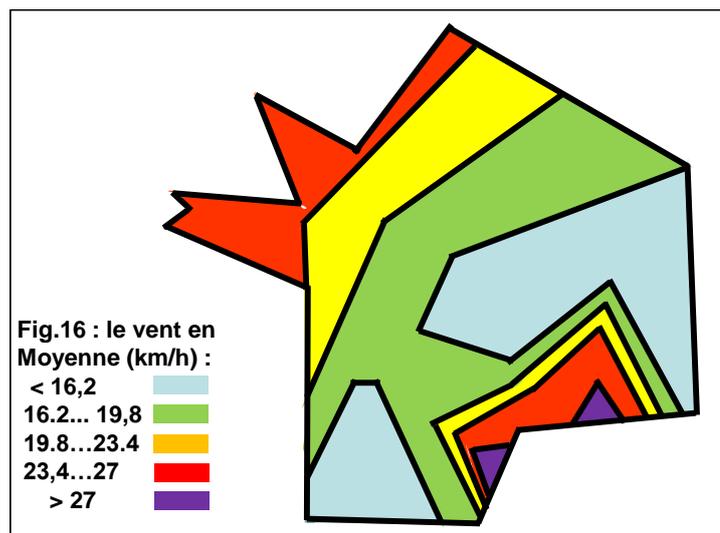
### 5.1.4.3 : Quelques coûts et prix

Bien que ce document soit uniquement technique, la fig.15 présente selon EDF, à titre tout à fait indicatif pour situer les technologies émergentes, ses coûts de production et ses prix d'achat à des producteurs et de vente à un particulier standard.

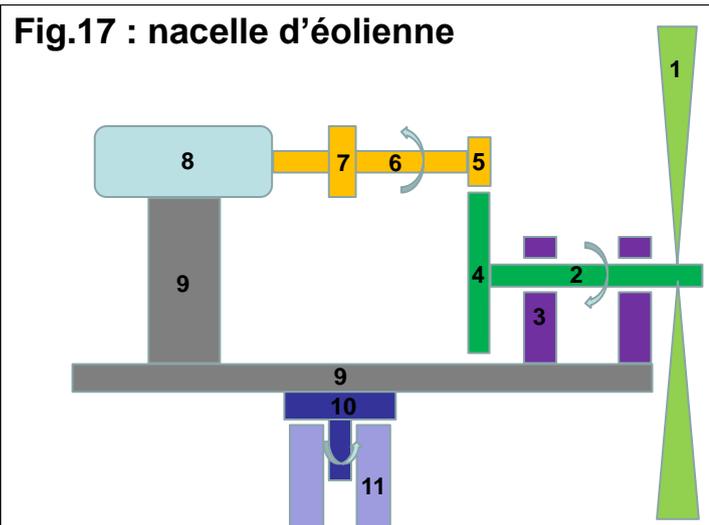
Ces chiffres sont souvent l'objet de discussions pour ne pas dire de polémiques. C'est en particulier le cas du nucléaire ; le coût EDF de 49€ (revu à 59€ par la cour des comptes) comprend bien des amortissements mais, par exemple, qu'en est-il des études dont la plupart ont été faites par le CEA ; quant au prix de vente du nucléaire, dit ARENH (Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique), qui est fixé régulièrement par la CRE (Commission de Régulation de l'Energie) c'est le prix de vente de cette électricité aux autres fournisseurs d'énergie.

## 5.2 : L'énergie éolienne

La fig.16 représente la vitesse moyenne du vent en France. Seules les zones rouge et violette sont considérées comme des zones favorables à la production d'électricité éolienne. Ces zones sont beaucoup plus importantes dans l'Europe du nord-est ou en Grande Bretagne.



La fabrication des éoliennes fait appel à des technologies qui sont en principe déjà industrielles. La fig.17 représente un schéma simplifié d'une nacelle d'éolienne. Les pales (1) tournent généralement un peu au dessus de 10tours/minute ; leur profil peut être pointu. Les arbres primaire (2) et secondaire (6) sont accouplés par des pignons (5,4), dits multiplicateurs, qui augmentent la vitesse vers 1500 tours/minute de vitesse. L'arbre secondaire, muni d'un frein (7), est couplé au générateur (8) à vitesse de rotation constante pour délivrer du 50 Hertz indépendamment de la vitesse du vent. Les supports de la nacelle (9) sont montés sur une couronne (10) qui peut pivoter en fonction de la



direction du vent. Enfin l'ensemble est disposé au sommet d'un mât (11).

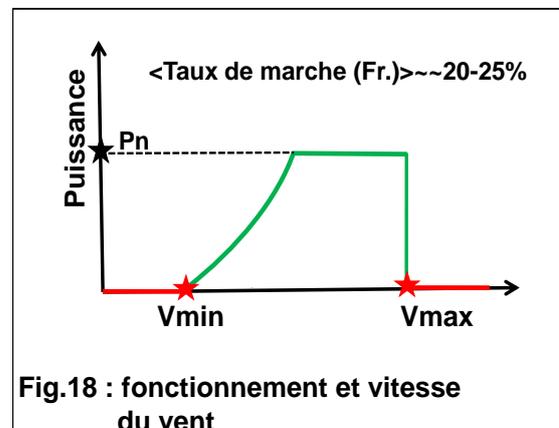
Actuellement en France on trouve les caractéristiques suivantes pour les éoliennes :

- 80 m < diamètre pales < 110
- 80 m < hauteur du mât < 100
- 1,8 MW < puissance nominale < 3

Leur production est modulée par la vitesse du vent (fig.18) entre une vitesse minimale, ~14km/h en dessous de laquelle la production est trop faible ; et une vitesse maximale, 90 km/h pour des raisons de sécurité. Le résultat est une production entre 20 et 25% de celle de la puissance nominale ( $P_n$  de fig.18, donnée pour ~50 km/h).

La production à grande échelle d'électricité éolienne soulève quatre problèmes :

- La vue des éoliennes est peu appréciée : pas de solution car les zones ventées sont bien dégagées.
- Le bruit : il s'atténue rapidement avec des distances raisonnables.
- La surface d'implantation est faible, mais la distance à respecter entre éoliennes est importante (ordre de grandeur en diamètre de rotor : 5 dans une rangée, 8 entre rangées). Un champ éolien a donc une grande surface qui peut par contre rester exploitée pratiquement en totalité par des cultures en zone agricole.
- Le stockage de l'électricité n'a pas plus de solution que pour le solaire, mais il se pose de manière moins aigue : le vent ne s'arrête pas la nuit, ni avec de la nébulosité et il est plus important l'hiver que l'été.



### 5.3 : Les agro-carburants

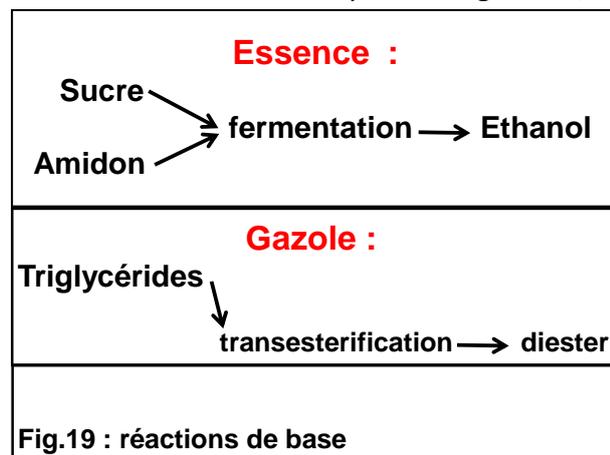
L'origine des agro-carburants est différente selon qu'il s'agit de carburants dits essence ou dits diesel. En France 2016, les 51Mm3 de carburant (~80% diesel) ont été additionnés de 2,2Mtep d'agro-carburants (~80% pour diesel).

\*En ce qui concerne l'essence, elle est actuellement additionnée en France avec de l'alcool ordinaire (éthanol) ou un de ses dérivés (ETBE : éthyl tertio butyl éther). Pour les voitures ordinaires, cette addition exprimée en volume d'éthanol et en simplifiant, est de 10% dans SP-E10 et 5% dans SP-95 et SP-98. Cet éthanol (fig.19) est obtenu à partir de fermentation de sucre ou d'amidon (un polymère de sucre). Le sucre peut provenir de canne à sucre (Brésil...), de betterave à sucre (France...) ... L'amidon peut provenir de maïs (USA, France...), de blé (France,...), de pommes de terre (France...)... Cette source d'énergie soulève deux problèmes :

Le premier est l'importance des surfaces nécessaires. Pour produire les seuls 10% d'alcool nécessaires pour additionner la totalité de l'essence française il faudrait 680 km<sup>2</sup> de culture de betteraves, avec le rendement d'alcool annoncé de 15m<sup>3</sup>/ha ; et 3.750 km<sup>2</sup> de maïs avec le rendement d'alcool annoncé de 2,7m<sup>3</sup>/ha. Et pour remplacer totalement le carburant automobile ces surfaces seraient donc respectivement de 6.800 et 37.500km<sup>2</sup>.

Le second est le rendement énergétique ; énergie de combustion de l'alcool / énergie nécessaire à la production de l'alcool. La production brésilienne ne semble pas poser de problème mais la controverse a éclaté au USA sur le maïs avec un mode de culture très productiviste; les laboratoires les plus optimistes annonçaient 1,6 (ce qui est tout de même faible ; les surfaces de culture devraient donc être augmentées de 60%) et les moins optimistes 0,8 (ce qui condamne le procédé).

\*En ce qui concerne le gazole, il est additionné actuellement en France à 8% de diester (EMHV : ester méthylique d'huile végétale). Ce diester est obtenu à partir de graisses, des triglycérides, contenues dans certaines graines par une opération chimique dite trans-esterification avec de l'alcool méthylique (fig.19). En France la graine utilisée est celle de colza. L'auteur n'a pas connaissance de critiques concernant le rendement énergétique. Pour les surfaces occupées, avec un rendement moyen annoncé pour le colza de 1,5 m<sup>3</sup> d'huile par hectare, il faudrait une surface cultivée d'environ 21.700km<sup>2</sup> pour additionner à 8% la totalité du gazole consommé actuellement en France et 271.000km<sup>2</sup> pour le remplacer totalement.



En ce qui concerne le remplacement total des carburants pétroliers par des agro-carburants, il nécessiterait des surfaces de culture tellement importantes que ceci ne semble pas envisageable.

## 6 : Sources d'énergie non présentées

**La géothermie :** La vraie géothermie, avec une source de chaleur permettant de faire de la vapeur pour alimenter un turboalternateur, ne concerne que des pays très spécifiques dont l'Islande est un bon exemple. Ce qui est aussi communément appelé « géothermie » et qui consiste à faire circuler de l'air dans des tuyaux enterrés, elle est à l'échelle de l'habitat individuel et elle conduit à des économies d'énergie qui sont toujours bonnes à prendre mais pas à une « vraie » source d'énergie.

**L'hydrogène :** c'est un vecteur d'énergie qu'il faut produire et non une source d'énergie.

**Pompes à chaleur, cogénération, cycles combinés....** : conduisent à des économies d'énergie qui sont toujours bonne à prendre

## **7 : Conclusion**

Dans les pays industrialisés, les sources d'énergie sont « centralisées et puissantes » et l'énergie est ensuite distribuée à la population qui a pris l'habitude de cette situation qui se résume pour elle à tourner un bouton électrique, un robinet de gaz ou appuyer sur une poignée de pompe à carburant. Même s'il n'y a pas présentement une menace, il est certain qu'avec une consommation d'énergie primaire de l'ordre de douze litres d'équivalent pétrole par habitant et par jour et des réserves énergétiques qui sont sur le déclin, la recherche de solutions nouvelles s'impose.

On a en premier passé en revue les grandes sources actuelles que sont le charbon, le pétrole, le gaz et le nucléaire avec leurs avantages et inconvénients puis ébauché leurs évolutions possibles. On a ensuite examiné les solutions alternatives les plus avancées que sont l'utilisation de l'énergie solaire, éolienne ou celle contenue dans les produits agricoles. Il est apparu, même sans parler d'économie, que leur généralisation dans leur état présent en remplacement des sources actuelles poserait de gros problèmes. Problèmes d'occupation d'énormes surfaces par des centrales solaires, par des champs d'éoliennes qui peuvent être cultivées mais dont la vue est peu appréciée ou par des cultures industrielles d'agro-carburants. Par contre si les énergies solaire et éolienne ne peuvent pas constituer des sources d'électricité « centralisées et puissantes », elles peuvent être un apport aux sources actuelles en étant déclinées localement et aux moments favorables.

En l'absence actuelle d'une solution de remplacement de nos sources d'énergie, une conduite prudente dans ces pays consiste à en diminuer l'utilisation dont on a vu que les deux postes principaux sont le chauffage et le transport. Chacun semble s'y employer puisque la consommation d'énergie y est maintenant soit constante soit en légère diminution. L'amélioration est nette sur le chauffage due d'une part à des attitudes plus raisonnables facilitées par la généralisation des régulations thermiques et d'autre part à l'isolation thermique des habitations avec des technologies disponibles mais dont il faut bien avouer qu'elles sont plus faciles à mettre en œuvre au moment de la construction que sur un bâtiment existant. Mais pour les transports les progrès sur la consommation des moteurs sont malheureusement à peu près compensés par l'augmentation du parc (à remarquer que la voiture électrique ou à hydrogène ne supprime pas la consommation d'énergie mais qu'elle la déplace sur la production d'électricité).

En conclusion de cet examen factuel, on ne voit pas très bien en l'état présent des techniques d'exploitation des énergies renouvelables comment elles pourraient permettre un simple « remplacement standard » des sources actuelles dont il convient donc de prolonger la durée de vie par leur amélioration et leur usage raisonnable.