

Vivre en économisant cette « chère énergie »

Jean-Claude Bernier est Professeur émérite de l'université de Strasbourg.

1 Introduction

L'énergie que nous dépensons depuis notre jeunesse n'est pas sans limites, l'économiser est un objectif d'actualité en période de crise. Le but de cet exposé est de faire prendre conscience que ses sources ne sont pas inépuisables, que son coût augmentera inexorablement et qu'il convient de changer progressivement nos comportements en examinant les leviers et les technologies qui peuvent nous y aider.

1.1. Quelques rappels sur l'énergie

Tout d'abord une définition : la calorie, c'est l'énergie nécessaire pour élever d'un degré un gramme d'eau. Notre équilibre en température fait que nos corps consomment environ 100 calories par heure, d'où une ration alimentaire normale qui ne devrait pas

trop dépasser 2 400 calories par jour. Le **tableau 1** résume quelques unités énergétiques.

Rappelons quelques ordres de grandeur. Un enfant de 30 kg qui monte un escalier d'un étage consomme environ 1 Wh. Un ouvrier qui creuse un trou dans le sol pendant une journée de travail de 8 heures aura consommé 50 Wh. Apparaît déjà la fantastique différence entre la capacité de l'énergie humaine et celle que nous dépensons tous les jours avec tous les instruments et machines électriques ou thermiques.

Voici d'autres chiffres. Pour l'électricité, la production 2011 en France est de 542 TWh dont 421 par le nucléaire (78 %) et 51 TWh par des centrales thermiques (gaz, fuel, charbon). Notons qu'une tranche nucléaire de puissance 900 MW produit annuellement de l'ordre de 8 TWh.

Tableau 1

Unités d'énergies.

Unité	Équivalents
1 calorie	4,18 joules
1 watt heure	3 600 joules
1 kWh = 1 000 Wh	3,6 giga joules
1 tWh = 1 000 gWh = 1 million de MWh	1 milliard de kWh

Pour l'électricité issue des sources renouvelables, l'hydraulique en France produit 50 TWh (9 %), l'éolien 11,9 TWh (2 %) et le photovoltaïque 1,8 TWh (0,3 %).

Par comparaison et pour montrer l'une des difficultés des énergies renouvelables, prenons l'exemple d'une éolienne off-shore de 5 MW, qui fonctionne en moyenne 1/5 du temps et fournit de l'ordre de 10 000 MWh/an soit 0,1 TWh. Il faudra 800 éoliennes de ce type pour avoir l'équivalent d'une tranche nucléaire.

1.2. Le changement climatique

C'est une raison forte avancée par les résultats du GIEC (Groupe international d'études du climat). Parlons d'abord de l'effet de serre. Une partie de l'énergie du soleil qui arrive sur la Terre est réfléchiée vers la stratosphère mais des molécules de gaz y font obstacle et renvoient une partie rayonnée vers le sol. S'il n'y avait pas d'effet de serre, la vie sur Terre serait difficile avec une température moyenne de -18°C . La vie a progressé avec un effet de serre modéré. S'il devenait trop fort, l'élévation de température induirait un fort déséquilibre (Figure 1).

Quels sont ces gaz à effet de serre (GES) ? D'abord l'eau des nuages bien sûr, puis le gaz carbonique CO_2 , le méthane CH_4 et les oxydes d'azote comme N_2O . Ces trois derniers ont augmenté fortement depuis 1850, début de l'ère industrielle (Figure 2), avec

Figure 1

Effet de serre.



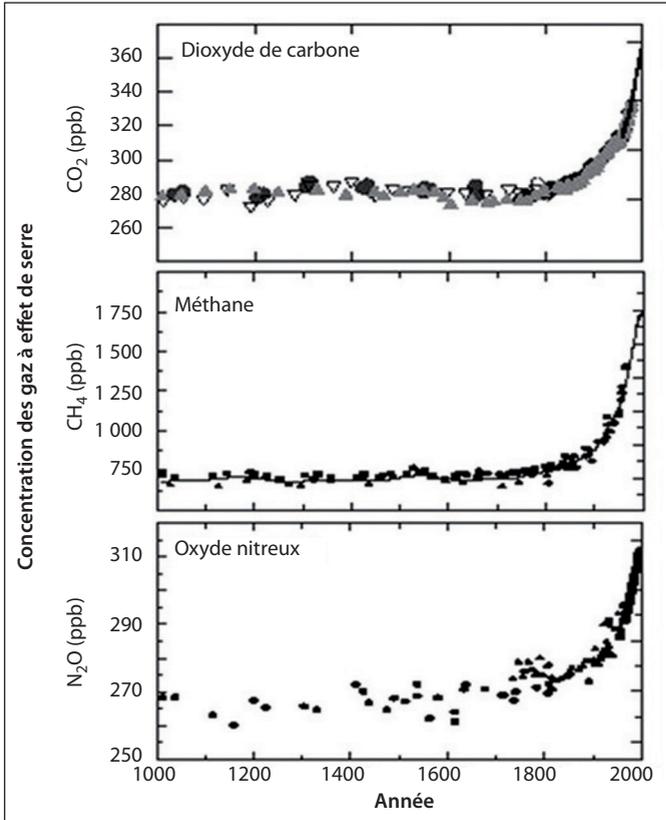


Figure 2

Concentration des GES en fonction des années.

des conséquences que décrit le GIEC telles que l'augmentation de la température moyenne de la Terre d'ici 2100 de l'ordre de 2° à 6° C et l'élévation du niveau des océans de 5 à 50 cm.

Le gaz carbonique dont la concentration dans l'atmosphère est passée de 250 ppm à 380 ppm vient bien sûr de la combustion des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) et des déforestations. Le méthane des zones humides, des fermentations et des élevages, le N₂O de l'agriculture et des engrais azotés.

Les secteurs qui sont le plus émetteurs de CO₂ et donc qui consomment le plus de combustibles fossiles sont en

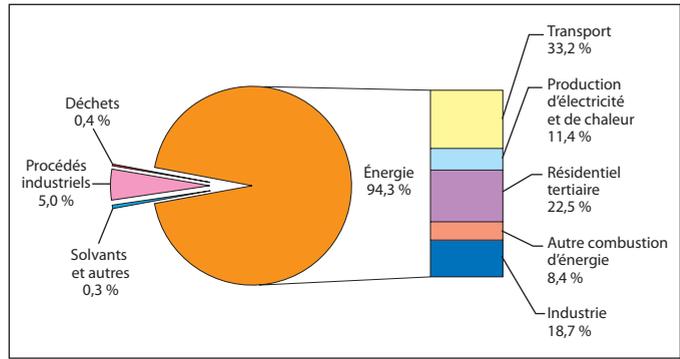
Europe d'abord la production d'électricité et de chaleur à 32 %, les transports à 23 % et le résidentiel et tertiaire à 15 %. En France, le schéma est différent. Ce sont d'abord le transport à 33 % et le résidentiel tertiaire à 22 % qui sont les plus gros émetteurs (Figure 3).

1.3. La menace du pic oil

La consommation d'énergie issue des ressources fossiles est menacée. Le pétrole, le gaz et le charbon ont mis des millions d'années à se former. Le propre d'une ressource naturelle, c'est qu'elle a un début et une fin. Son exploitation suit une courbe en

Figure 3

Répartition des sources d'émission de CO_2
 Source : Agence européenne pour l'environnement d'après Citepa, juin 2010



cloche (Figure 4). Si on l'exploite massivement, la partie descendante de la courbe arrive inexorablement à zéro après plusieurs années. Pour le pétrole conventionnel, les experts mettent son maximum de production entre 2020 et 2040, certains même pensent que nous sommes déjà dans le palier d'exploitation.

On peut constater sur les courbes que la production a de plus en plus de mal à suivre la demande de consommation et que, évidemment, plus l'écart s'élargit, plus les tensions sur le prix s'exacerbent (Figure 5). La courbe donnant le prix du baril de pétrole en fonction de la production mondiale en milliards de barils est impressionnante. Elle souligne aussi que le prix d'ex-

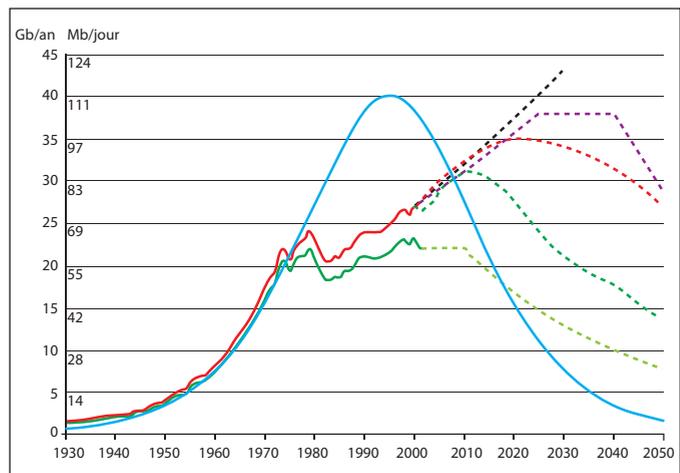
traction off-shore à grande profondeur ou des schistes bitumineux dans le grand Nord-Est est 5 à 10 fois plus coûteux qu'au Moyen-Orient, d'où des sommets prévisibles du prix du baril mais surtout durablement au-dessus de 100 \$-120 \$. Pour l'automobiliste, la conséquence est que le litre d'essence restera durablement au-dessus de 1,50 €.

1.4. L'électricité – Vecteur d'énergie

Pour l'électricité, on dit que c'est une énergie transportable. En réalité, c'est plutôt un vecteur énergétique. Elle restera donc théoriquement plus chère que l'énergie issue directement de la combustion d'un

Figure 4

Évolutions comparées de la production et de la demande en fonction des années.
 Courbe bleue : courbe modèle de production du pétrole selon le géophysicien MK Hubbert, courbe pleine rouge : courbe actuelle de production (toutes sources confondues), courbe pleine verte : courbe actuelle de production économiquement exploitable, courbe pointillée noire : prévision de la demande selon l'Agence internationale de l'énergie, courbe pointillée vert foncé : prévision de la demande (toute source confondue) selon l'ASPO (association pour l'étude du pic pétrolier et gazier), courbe pointillée vert clair : prévision de la demande de pétrole économiquement exploitable selon l'ASPO.



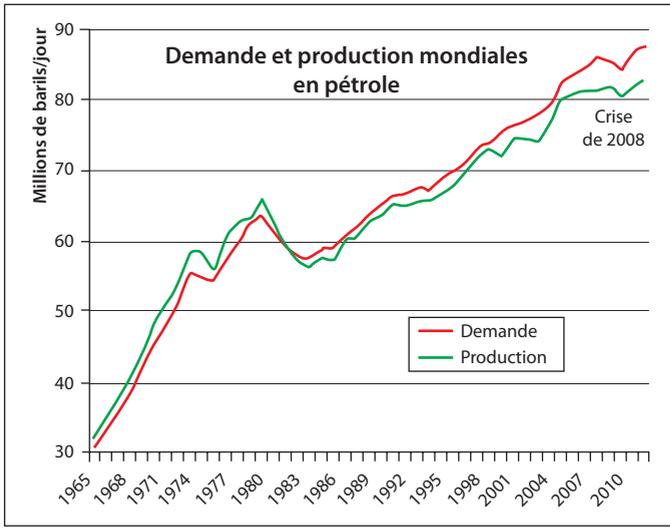


Figure 5

Écarts entre la production et la demande depuis 1960.
 Source : Dr Thomas Chaize
 www.dani2989.com

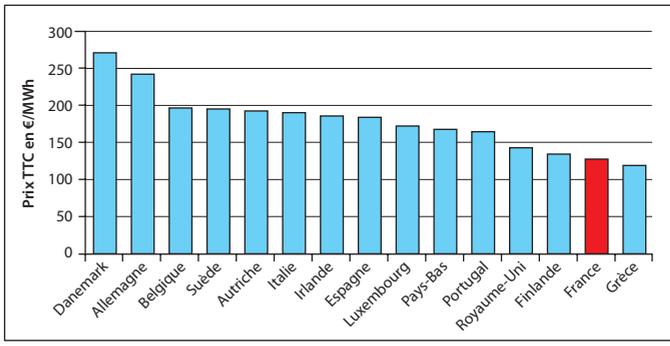


Figure 6

Prix de l'électricité en Europe (pour le prix du kWh, divisez par 1 000).
 Source : M. Cruciani – IFRI.
 Graphique Sénat

fluide fossile. (NB : 1 L de diesel = 10 kWh !). Le graphique donnant les prix de l'électricité en Europe pour le particulier reflète les moyens d'obtention du kWh (Figure 6), deux pays sont au-dessus de 20 c€/kWh, le Danemark et l'Allemagne, la moyenne des pays est entre 20 et 15 c€. La France grâce au nucléaire et à l'hydraulique est autour de 12 c€/kWh, ce qui présente un avantage pour le porte-monnaie et notre compétitivité mais des inconvénients pour les incitations à l'économiser. La transition énergétique pour la génération qui vient et pour nos enfants et petits-enfants se fera avec une énergie qui deviendra rare et chère. Par conséquent, face à ce défi, si l'on veut amortir le choc, il

faut agir sur les secteurs où le potentiel d'économie est fort. La chimie peut nous y aider.

2 Énergie et isolation

L'énergie dépensée par l'habitat et le tertiaire représente 23 % de la consommation énergétique en France. C'est donc un volume de dépenses important et une contribution non négligeable au déficit de la balance commerciale. La priorité serait de suivre le slogan « l'énergie la moins chère et la plus écologique est celle qu'on ne dépense pas ». C'est aussi ce que j'appelle les « négawatts ». Il faut donc renforcer l'efficacité énergétique de l'habitat individuel,

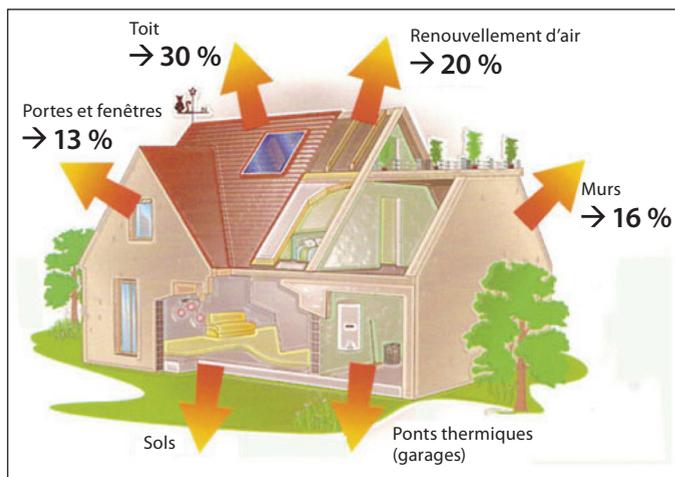


Figure 7

Principales pertes de chaleur pour une habitation.

des bâtiments collectifs et du tertiaire.

Quand une maison ou un bâtiment est chauffé, les échanges de température avec l'extérieur, plus froid, occasionnent des pertes de calories (Figure 7). Les estimations sont de 30 % par le toit, de 16 % par les murs et le sol, de 13 % par les fenêtres et de 20 % par les ventilations.

2.1. Quelques principes d'échange de la chaleur

Lorsqu'un corps ou une paroi sépare deux zones à des températures différentes $T_1 > T_2$, les lois de l'équilibre thermodynamique font que les calories diffusent à travers cette paroi (Figure 8).

Si elle est conductrice de la chaleur, le flux ne s'arrêtera que lorsque l'équilibre sera atteint, $T_1 = T_2$. Si T_1 reste supérieur à T_2 , le flux sera permanent de T_1 vers T_2 .

Le flux de chaleur est fortement dépendant de la résistance thermique de la paroi : R et $R = e/\lambda S$ où e est l'épaisseur en mètre, λ la conductivité

thermique exprimée en watt. degré K par mètre ($W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$) et S en m^2 .

Plus R est grande, plus la paroi est isolante et le flux de chaleur faible.

La conductivité thermique λ est caractéristique d'un corps. On peut s'en apercevoir si l'on dispose d'une casserole en cuivre, très bon conducteur, avec un manche en métal et d'une autre casserole en inox avec un manche en bois ou en plastique. On se brûlera la main plus facilement avec la première. Les métaux sont plutôt de bons conducteurs de la chaleur. Inversement, la conduction $u = 1/R$ s'exprime en $W/m^2 \cdot K$. Le flux de chaleur est proportionnel à la conductivité λ et à la différence de température ΔT sur la distance X .

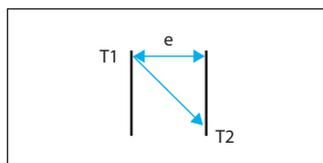
Le Tableau 2 montre que les métaux sont les meilleurs conducteurs et donc les moins bons isolants de la chaleur. Le verre et le béton conduisent moyennement. Le polystyrène expansé (PSE), la paille, la laine de verre sont de bons isolants. L'air sec et les gaz rares comme l'argon sont encore de meilleurs isolants. Quand on sait que ce sont les vibrations des molécules ou des atomes qui sont les vecteurs de la conduction, le vide est alors l'isolant absolu. À partir de ces propriétés, la chimie a permis de découvrir ou re-découvrir les matériaux d'isolation.

2.2. Les matériaux de structure

Pour les matériaux de structure, dans la construction, il faut associer des ensembles

Figure 8

Échanges à travers une paroi.



de blocs de type céramique ou béton à de l'air ou à des couches peu conductrices et éventuellement les doter d'une barrière isolante si possible externe.

La brique monobloc en terre cuite alvéolaire comporte une disposition en labyrinthe qui rend le pont thermique que doivent suivre les calories long de 100 cm sur une brique d'épaisseur 37 cm (**Figure 9**). On peut encore améliorer la performance en remplissant les alvéoles avec de la perlite expansée (pierre volcanique naturelle) qui bloque l'air emprisonné entre les parois céramiques. La comparaison des parpaings classiques qui servent encore majoritairement à la construction de résistance thermique faible, $R = 0,20$ ($U = 5$), avec ces briques à isolation renforcée où $R = 5,5$ ($U = 0,18$) est instructive, elle montre un rapport de pertes de calories de 1 à 27 !

Les maisons à ossature en bois, très nombreuses dans les pays scandinaves et aux États-Unis, sont encore peu répandues en France. Elles ont pourtant bien des avantages ; la rapidité de construction et des structures de panneaux à faible conductivité thermique grâce à des remplissages d'isolants fibreux ou synthétiques. Le bois est aussi

Tableau 2

Des conductivités thermiques.

λ des métaux		λ matériaux		λ gaz	
Argent	418	Verre	1,2-1,4	Air sec	0,026
Cuivre	390	Béton	0,9	Hélium	0,15
Aluminium	237	Bois chêne	0,16	Argon	0,017
Acier	46	Polystyrène expansé	0,036	Krypton	0,010
		Perlite expansée	0,038		
		Paille	0,04		
		Laine de verre	0,04		
		Laine	0,05		

une bonne solution d'isolation externe.

2.3. Les isolants

Les isolants fibreux les plus courants sont des fibres minérales (**Figure 10**), fibres de verre à basse concentration en sodium ou fibres de roches fondues à haute température. Les fibres bio-organiques issues de plantes fibreuses utilisées pour le textile, comme le lin ou le chanvre, retrouvent une nouvelle jeunesse grâce à l'utilisation des restes de fibres courtes compactées sous forme de panneaux isolants. Les feutres de lin ou de chanvre ont une conduction faible ($\lambda = 0,39$), comparable à la laine de verre ($\lambda = 0,40$). La paille qui a une structure

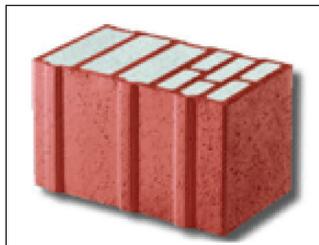


Figure 9

Types de briques monobloc.



Figure 10

Isolants fibreux – fibres minérales et fibres bio-organiques.

naturelle en canaux creux est un isolant bien connu de nos ancêtres qui la mélangaient à l'argile pour en faire des panneaux composites de torchis entre les poutres de soutènement. On trouve également des laines de coton. Toutes ces fibres doivent recevoir un traitement chimique d'ignifugation aux borates par exemple qui les protège aussi des rongeurs.

Les isolants synthétiques sont des matériaux en général issus de la pétrochimie, ils peuvent être trouvés sous deux formes ; le polystyrène expansé (PSE) avec des porosités ouvertes et extrudé avec des porosités fermées. Ils sont pré-expansés sous forme de sphères contenant du pentane puis moulées à la vapeur sous forme de plaques d'isolation de 2 à 10 cm d'épaisseur... Ce sont de bons isolants, peu sensibles à l'humidité avec des conductivités λ de 0,03 à 0,035. Le polyuréthane fabriqué à partir de l'urée fait aussi partie des isolants synthétiques ainsi que les mousses phénoliques. On peut aussi citer les isolants en couches minces constitués de multiples couches de

polyéthylène ($\lambda = 0,037$), revêtues d'une mince couche d'aluminium réfléchissante et des couches de polyéthylène bulles qui emprisonnent de l'air. Ces multi-couches allient isolation et réflectivité. Ils auraient selon les fabricants sous 2 cm d'épaisseur la même efficacité que 10 cm de laine de verre. Je serais plus prudent. Apparaît aussi depuis plusieurs années la ouate de cellulose, obtenue à partir de papier journal recyclé par un procédé mécanique et chimique. Disponible en vrac, elle peut être protégée par l'oxyde de bore ou des borates pour en diminuer l'inflammabilité.

2.4. Les vitrages

Il faut bien sûr une surface vitrée minimum dans une maison pour l'éclairage mais aussi pour laisser pénétrer en hiver le rayonnement solaire. Mais un bâtiment perd environ 15 % de l'énergie par les fenêtres et les huisseries.

Le verre, bien que peu conducteur ($\lambda = 1,2$), n'est pas un bon isolant sous forme massive. On le constate facilement sur les fenêtres à vitrage simple,

d'épaisseur de 4 à 6 mm, qui, en hiver, se couvrent facilement de buée sur la paroi intérieure quand le froid sévit à l'extérieur. C'est pourquoi ont été développées les fenêtres constituées de deux lames de verre de 4 mm, séparées par un espace de 16 mm où se trouve de l'air sec, le tout étant scellé par un joint métallique ou plastique. Le coefficient de conduction s'exprime par la valeur U_g conduction thermique du vitrage et U_w conduction thermique de la fenêtre (vitrage + huisserie). Depuis quelques années sont commercialisés des vitrages à isolation renforcée (VIR) qui emprisonnent de l'argon à la place de l'air et dont l'une des faces de la lame intérieure est

revêtue d'une mince couche nanométrique métallique réfléchissant les rayonnements infrarouges (Figure 11). Certaines fenêtres peuvent aussi être équipées de triple vitrage (Tableau 3).

2.5. Objectifs de l'efficacité thermique dans l'habitat

Le règlement thermique RT 2012 qui a succédé à celui de 2005 fixe comme objectif une dépense énergétique pour les habitations neuves au maximum de 50 kWh/m² par an et il impose pour les ventes d'habitations anciennes un diagnostic thermique permettant de les classer sur une échelle allant du A vert (50 kWh), logement économique, au G rouge

Figure 11

Vitrage à isolation renforcée. L'argon isole du froid la lame intérieure et le revêtement renvoie les infrarouges vers l'intérieur de la pièce.

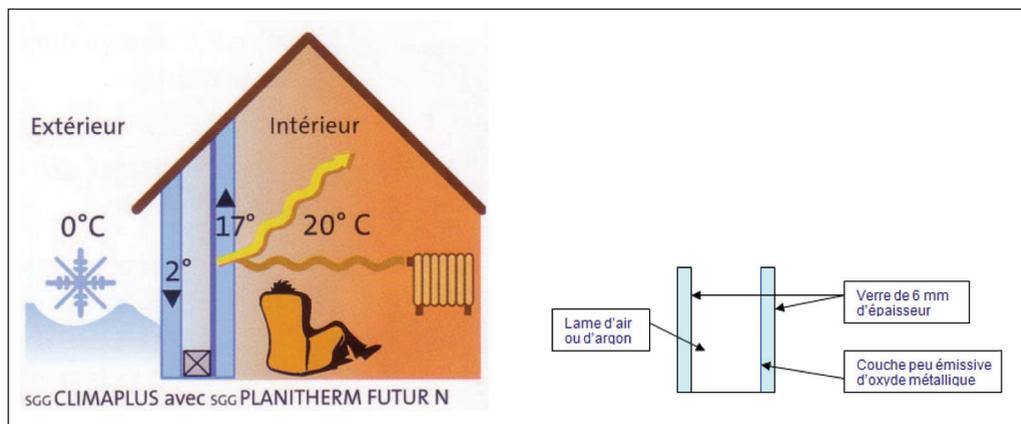


Tableau 3

Pertes en énergie d'une baie vitrée de 4 m² avec un ΔT de 20° int – ext.

Type de vitrage	U_g en W/m ² · K	Pertes baie vitrée
Simple	7	560 W
Double	2,5	200 W
Double isolation renforcée	1,3	104 W
Triple et IR	0,8	44 W

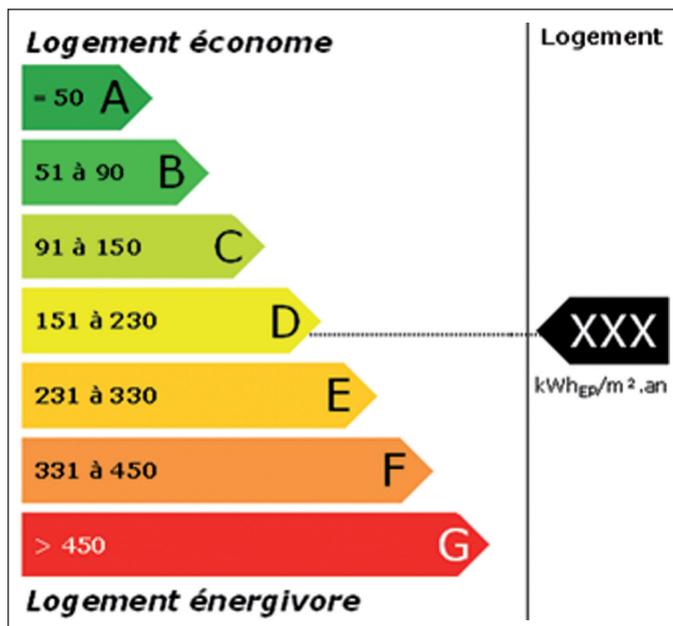


Figure 12

Classement des habitats en fonction de leur efficacité énergétique.

(450 kWh), logement énergivore, comme pour les équipements électroménagers (Figure 12).

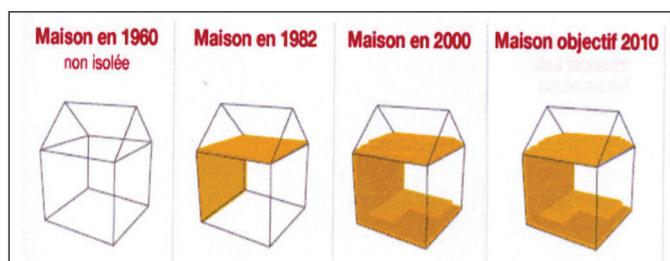
Avec une consommation de 50 kWh/m² et par an, c'est le label BBC (Basse consommation énergétique) calqué sur le *Passivhaus* d'outre-Rhin qui est accordé. Pour 2020, le label maison passive ou zéro de consommation énergétique demandera en plus un système de production autonome, soit solaire, soit pompe à chaleur ou double ventilation à récupération des calories. Si l'on comprend assez bien que ces normes pourront être atteintes

pour les nouvelles constructions, moyennant une conception architecturale adaptée et un surcoût estimé à 20 %, le problème reste entier pour les constructions anciennes où un grand programme d'investissements pour l'amélioration de l'habitat devrait être lancé (Figure 13).

En effet, l'isolation des bâtiments anciens est à la fois rentable pour le particulier et une affaire pour la nation. Prenons comme exemple une construction des années 1960 non isolée (avant les premiers chocs pétroliers) et qui consommait de l'ordre de 7 000 L de fuel annuellement. En 1980, les propriétaires avaient fort heureusement isolé les combles avec de la laine de verre (LV) et un mur au nord avec un panneau isolant, ce qui avait permis de ne plus consommer que 2 200 L/an de fuel. En 2010, les nouveaux propriétaires procèdent à une isolation standard en remplaçant les fenêtres par des doubles vitrages (VIR), en renforçant l'isolation des combles (25 cmLV), celle des murs et du sol. L'investissement standard a nécessité 12 500 € mais a permis de ne plus consommer que 800 L de fuel par an. Soit une économie de 1 400 € annuellement en supposant que le fuel domestique ne subisse pas de nouvelles hausses

Figure 13

Étapes de l'isolation d'un habitat ancien.



et une rentabilité de l'ordre de 8 ans. Si l'habitation était pourvue d'un chauffage électrique, l'économie serait de 14 000 kWh/an, ce qui se traduit en euros par 1 700 € et une rentabilité en 7 ans. Rentabilité qui peut encore être réduite à 5 ans par les crédits d'impôts afférents sur certains types d'équipements (matériaux d'isolation, fenêtres VIR, panneaux de façade isolants...).

C'est donc une rupture des comportements citoyens et de la conception de l'habitat voire de la ville qui doit être engagée dans les prochaines années et de façon urgente. En effet, la dépense énergétique par habitant en France est de 2 500 kWh/an alors qu'en Allemagne elle n'est que de 1 700 kWh/an. Il y a donc dans le tertiaire et l'habitation individuelle des efforts à faire. Pour respecter la norme BBC, on estime que le surcoût à la construction est de l'ordre de 15 à 20 %. Il y a d'autre part 30 millions d'habitations anciennes à rénover d'ici 2050 avec un objectif de l'ordre de 400 000 par an. On estime que cet objectif amènerait un coût de rénovation de l'ordre de 8 milliards d'euros par an mais créerait aussi corrélativement environ 100 000 emplois. En imaginant un plan d'ensemble de 200 000 constructions neuves aux normes BBC et la rénovation thermique de 400 000 logements anciens, l'économie annuelle serait de 12 TWh, soit l'équivalent de 1,5 tranche nucléaire. Cette grande ambition ne peut se faire qu'à deux conditions :

- une amélioration des techniques d'isolation intérieure avec un minimum de pertes

de surface, extérieure avec des matériaux fiables sur la durée et esthétiques, couplées à une formation et meilleure expertise de l'artisanat du bâtiment ;

- une amélioration de l'aide publique par des prêts à taux zéro et des avantages plus conséquents par crédits d'impôts nettement supérieurs aux 22 % actuels accordés sur les matériaux posés.

3 Énergie et transports

On se rappelle que les transports en France représentent 33 % des émissions de CO₂ et présentent donc un gisement d'économie important, d'autant que, à plus de 95 %, ils consomment des carburants issus du pétrole et donc de ressources fossiles importées qui contribuent aussi au déficit de la balance commerciale. Il y a en France 38 millions de véhicules, sans compter les poids lourds étrangers, qui empruntent notre réseau routier du Sud au Nord. Pour les particuliers, nous disposons essentiellement d'automobiles à moteurs thermiques avec un parc à 70 % diesel dégageant CO₂ et NOx. En moyenne, les trajets journaliers sont inférieurs à 20 km et la distance annuelle parcourue est de l'ordre de 12 000 km, l'automobiliste moyen émet en moyenne 160 g de CO₂/km, soit environ 2 tonnes/an. Tous ces véhicules ne seraient pas développés sans l'inestimable réserve d'énergie contenue dans un litre de carburant de l'ordre de 10 kWh, ce qui permet malgré le faible rendement du moteur thermique

de stocker 40 L soit 400 kWh en une ou deux minutes et de parcourir environ 700 km.

Comment la chimie peut-elle contribuer aux économies et à un changement radical de comportement ?

3.1. La contribution de la chimie à l'automobile

Directement ou indirectement, la chimie peut agir sur divers leviers pour réduire l'impact des véhicules sur l'environnement (*Figure 14*). Tout d'abord, par l'allègement des structures en remplaçant une partie de la carrosserie d'acier par des matériaux composites polymères ou de l'aluminium plus léger. Les plastiques et les mousses de polyester ont envahi l'habitacle et contribuent à alléger les véhicules. De même, les moteurs et les pièces de suspension en alliages d'aluminium ont remplacé la fonte et l'acier, certaines parties vitrées peuvent être remplacées par des polycarbonates. On estime qu'un allègement de 100 kg se traduit par une économie de carburant de l'ordre de 0,6 L/100 km. Les enveloppes pneumatiques multicouches avec des additifs de silice fine permettent des économies de car-

burant tout en préservant l'adhérence et la sécurité au freinage. Les lubrifiants de synthèse diminuent les frottements et améliorent la longévité des moteurs, il en est de même des revêtements zingués et des cires anticorrosion qui préservent la plate-forme et la carrosserie de la corrosion. N'oublions pas les pots catalytiques et les catalyseurs sophistiqués sur monolithe ou les filtres à particules avec sels de terre rare qui ont permis la dépollution des gaz et des fumées d'échappement.

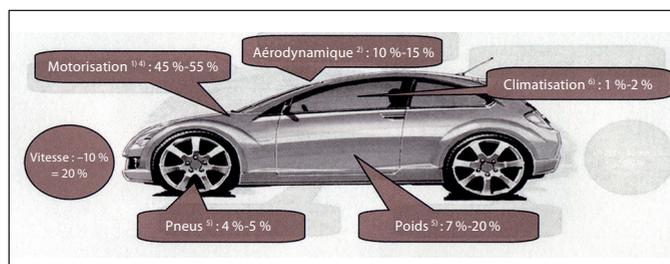
3.2. Les biocarburants

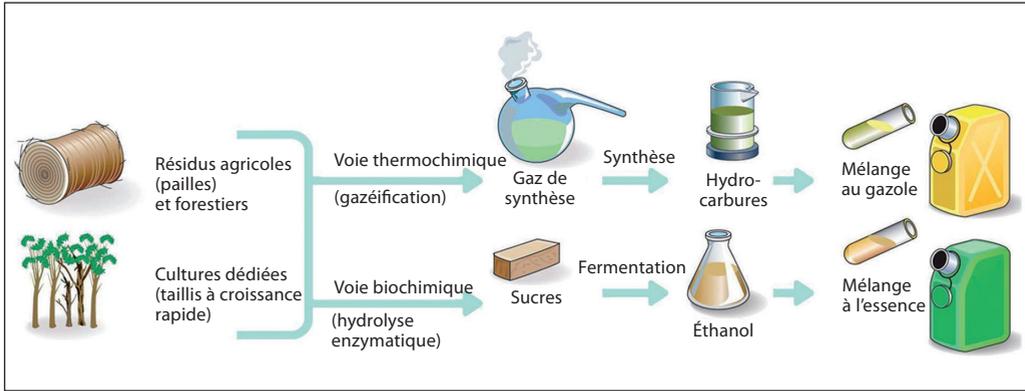
Une autre contribution de la chimie est la fabrication des biocarburants (*Figure 15*). Ils sont de deux types, l'alcool et ses dérivés, et les huiles végétales et leurs dérivés :

- l'alcool est obtenu à partir de la fermentation de sucres, donc à partir de plantes de culture sucrière, canne à sucre, betterave, ou d'amidon transformé par hydrolyse en sucre, provenant du blé, du maïs ou de la pomme de terre. L'éthanol peut être utilisé pur (Brésil) ou sous forme d'éthyl ou méthyl tertio butyl ether (ETBE ou MTBE), transformés en raffinerie et mélangés à l'essence ;

Figure 14

Contribution de la chimie au véhicule économique (rapport PIPA).





– les huiles, obtenues par pressage d'oléagineux tels que le colza, le tournesol, le coprah, peuvent s'utiliser directement dans certains moteurs diesel (tracteurs) mais on préfère les utiliser sous forme d'ester méthylique EMHV obtenu par transestérification avec la glycérine comme sous-produit.

Jusqu'ici la production des biocarburants est restée assez marginale, de l'ordre de 1 % des combustibles liquides sur le plan mondial et 0,5 % de la consommation d'énergie, alors que la valorisation thermique des végétaux (bois, paille, taillis...) en représente plus de 10 %. En Europe, une directive européenne de 2003 voulait imposer au moins 7 % de biocarburants en 2012, voire 20 % en 2020. Ces proportions ont été revues à la baisse en 2012 avec 5 %, car l'expérience a permis d'affiner la réflexion sur deux points :

– l'efficacité énergétique, car la thermodynamique est incontournable. D'abord le contenu énergétique de l'éthanol est plus bas que celui de l'essence où son addition fait grimper la consommation de 10 à 20 %. Par ailleurs, une

certaine quantité d'énergie (non renouvelable) est nécessaire à leur fabrication si pour l'alcool de canne à sucre le gain énergie produite/énergie consommée est appréciable et encore raisonnable pour les huiles végétales et EMHV. Le rapport est à peine supérieur à 1 pour l'alcool issu du blé, du maïs et même de la betterave (**Tableau 4**) ;

– la concurrence avec les cultures vivrières : la transformation de forêts et de prairies en terres cultivées industriellement consomme des produits phytosanitaires, des engrais et augmente les émissions de N_2O . Les productions ont provoqué et provoquent encore une inflation des prix des produits alimentaires, blé, maïs et des problèmes de dérèglements locaux de l'environnement.

Il est donc clair que ces biocarburants de première génération à part l'alcool de canne à sucre et éventuellement les EMHV qui ont des efficacités énergétiques respectivement de 5 et 3 ne sont pas la solution. Le risque d'inflation des produits alimentaires à l'échelle mondiale (le maïs a augmenté de près de 50 %) est

Figure 15

Schéma de principe de fabrication des biocarburants.

Source : IFPEN

Tableau 4

Efficacité énergétique.

Eff = Énergie obtenue / Énergie dépensée pour la fabrication.

Agrocarburant	Efficacité Énergétique Eff
Éthanol de canne à sucre	5,8 à 5
Éthanol de betterave	1,3 à 1,20
Éthanol de blé	1,2 à 1,05
Huile de colza	3,7 à 3,5
Huile de tournesol	3,0 à 2,7
EMVH	3,2 à 2,8

trop dramatique pour les pays en voie de développement. En France, l'ajout d'EMHV au gasoil est devenu banal, le SP85E10 et le E85 qui contiennent les dérivés de l'éthanol n'ont pas rencontré le succès escompté malgré des taxes moins lourdes. La différence de TIPP a été payée par les automobilistes qui ont ainsi subventionné les agrocarburants à hauteur de 3 à 5 Mrd €. Ce n'est pas une très bonne affaire pour eux mais plutôt une bonne affaire pour les agriculteurs notamment les betteraviers. Il faut sans doute attendre les biocarburants de seconde génération qui, par procédés chimiques, utiliseront les parties de plantes non valorisables (paille, taillis, bois...). Un espoir se lève grâce à la recherche sur les « algo-carburants » dits de troisième génération qui consiste à extraire des huiles à partir de micro-algues cultivées en bassin et qui peuvent être mélangées à l'essence ou au gazole. Une jeune entreprise, Fermentalg, à Libourne en Aquitaine, est assez avancée dans le développement de cette voie.

3.3. Le véhicule électrique

Comment remplacer la réserve liquide d'énergie du réservoir d'une automobile ? On peut utiliser le gaz sous pression, mais c'est encore une ressource fossile. L'idée est donc de remplacer le moteur thermique par le moteur électrique dont le rendement est 3 fois meilleur. Mais le challenge est de savoir stocker de l'énergie électrique dans une batterie à la place du carburant. La première batterie au plomb a été réalisée par un Français, Gaston Plantié, en 1859. Depuis, elle a certes été perfectionnée mais elle reste avec une énergie et une puissance spécifique faible, de l'ordre de 30 à 40 Wh/kg. L'électro-chimie depuis plus de 150 ans a cherché et trouvé de meilleures couples d'électrodes et d'électrolyte pour remplacer le plomb et l'acide sulfurique. C'est d'abord le Ni-Cd puis le Ni-Hydrures de terres rares et maintenant le lithium-oxyde de cobalt et de manganèse ou lithium-phosphate mixte de fer ou encore lithium-polymère qui ont permis de multiplier par 5 l'énergie spécifique proche de 150 à 200 Wh/kg (*Figures 16 et 17*).

Compte tenu du contexte environnemental et de la fin des ressources du pétrole, y a-t-il un véritable intérêt au véhicule électrique (VE) ?

Penchons-nous sur les rendements et dépenses énergétiques. Le rendement « *tank to wheel* » pour le moteur thermique est de 22 % pour le diesel et de 18 % pour l'essence. Le même rendement de « la batterie à la roue » pour le moteur électrique est de 72 %.

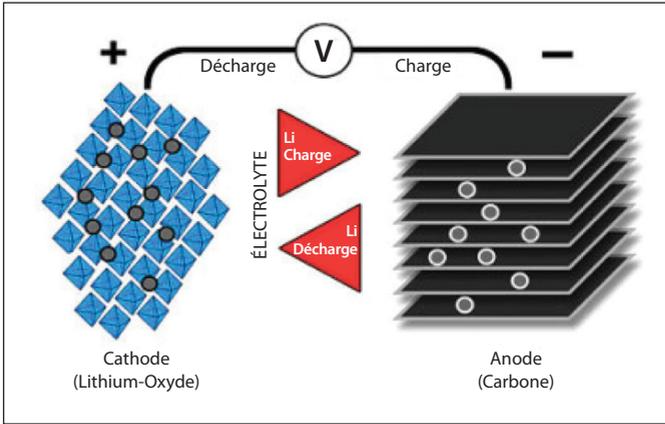


Figure 16

Principe d'une batterie ion-lithium.
Source : Battery University

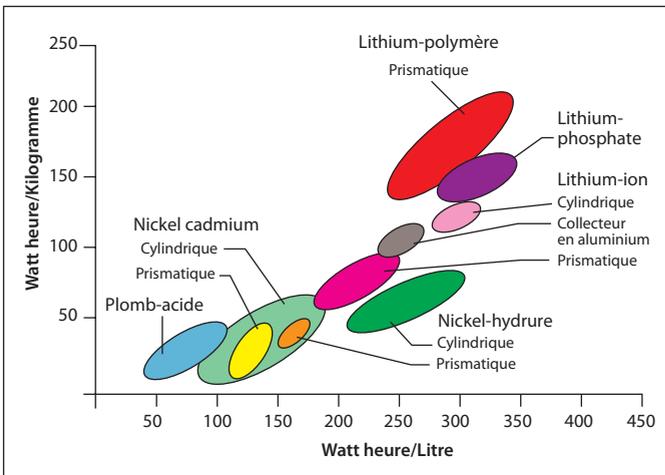


Figure 17

Évolution des puissances spécifiques des différents types de batteries.

Pour une voiture moyenne diesel qui consomme 6 L/100 km soit 60 kWh, son équivalent électrique consommera $60 \times 22/72 = 18,3$ kWh. Mais avec récupération du courant à la décélération et au freinage, on tomberait à 15 kWh/100 km soit quatre fois moins.

Notons en passant que la combustion de 6 litres de diesel entraîne l'émission de 15,6 kg de CO₂ alors que 15 kWh électrique correspond en France à 1,1 kg de CO₂ soit 14 fois moins. Il faut bien sûr tenir compte de la façon dont

cette électricité est produite. L'origine nucléaire et hydraulique donne un mix français très favorable, il n'en est pas de même en Allemagne ou au Danemark où les centrales thermique au charbon et au gaz sont nombreuses. Si la thermodynamique et l'environnement y trouvent leur compte, qu'en est-il de l'autonomie ? En reprenant notre exemple de la voiture moyenne qui consommerait 15 kWh au 100 kilomètres, avec la batterie au plomb (40 kWh/kg) c'est inconcevable, il faudrait 1 000 kg

pour parcourir 250 km, 500 kg pour une batterie Ni-MH mais 250 kg avec une batterie au lithium (150 Wh/kg), ce qui devient plus réaliste.

L'objectif de deux millions de véhicules électriques en 2020 a parfois suscité des polémiques en affirmant qu'il faudrait alors construire plusieurs centrales nucléaires pour faire face à la demande des recharges des batteries. Un calcul simple basé sur des parcours journaliers correspondant à la moyenne de 15 à 25 km et à une recharge de 25 kWh par semaine exigerait par an $25 \times 50 \times 2 \cdot 10^6 = 2,5$ TWh soit à peine le quart de la production annuelle d'une tranche nucléaire.

La comparaison avec le moteur thermique est sans appel. Une consommation de 10 L par semaine conduit pour 2 millions de véhicules à 1 milliard de litres soit une dépense de l'ordre de 1,5 Mrd€ comparés aux 300 M€ de dépenses des véhicules électriques qui correspondent de plus à 190 000 T CO₂ au lieu des 2,6 millions de tonnes émises par les véhicules thermiques.

Il est clair que l'économie en France y compris sur l'importation des carburants et le moindre impact à l'environnement sont favorables aux véhicules électriques, le fait que 37 % des foyers possèdent deux automobiles, encourage l'achat comme seconde voiture d'un véhicule électrique, encore faut-il que la production de masse entraîne une baisse du coût de ceux-ci et qu'une infrastructure de recharge rapide puisse se développer.

4 L'énergie gratuite : le soleil et le vent

4.1. L'énergie solaire

Le soleil qui nous apporte son rayonnement est une source naturelle et renouvelable à l'échelle de milliards d'années de l'énergie. Le rayonnement solaire varie en fonction de la latitude, en Europe la moyenne est de 200 W/m² (Figure 18). C'est évidemment aussi une énergie intermittente car elle est masquée par les nuages et elle est nulle la nuit. On transforme l'énergie rayonnée en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques qui sont constitués d'assemblages de semi-conducteurs tels le silicium qui a une bande d'absorption particulièrement bien placée face aux longueurs d'ondes du rayonnement solaire. 90 % des cellules des panneaux utilisent le silicium qui est fabriqué en partant du sable (SiO₂) par une chimie assez complexe qui fournit un produit de grande pureté (99,999), légèrement inférieure à la pureté nécessaire pour l'électronique. D'autres composés tels l'arséniure de gallium (AsGa) et des systèmes à doubles ou triples jonctions ont des rendements photoniques meilleurs, mais le silicium sous forme mono- ou polycristalline a des rendements honnêtes de 13 à 17 %. Les couches minces de tellure de cadmium ou de séléniures tels que Cu(InGa)Se₂ (CGIS) commencent à se développer avec des rendements de l'ordre de 12 % et sont promis à un bel avenir dans la mesure où la quantité de matière reste faible et

que leur mise en œuvre sur de grandes surfaces est plus facile. La recherche sur les semi-conducteurs organiques dérivés des polythiophènes se poursuit car là encore la facilité de mise en œuvre est un atout. Mais il faut encore augmenter leur rendement et prouver leur fiabilité dans le temps.

En France, l'objectif d'atteindre une puissance de 5 000 MW installés en 2012 a permis l'installation de panneaux chez les particuliers et de fermes photovoltaïques (Figure 19) depuis 2007. On observe un certain ralentissement en 2011 et 2012 dû à un changement de politique d'aide indirecte par la vente de la production électrique à EDF à des tarifs qui ont été revus à la baisse pour, d'une part, limiter les effets d'aubaine et, d'autre part, ralentir l'invasion de panneaux d'origine chinoise. Les tarifs de rachat restent cependant avantageux, de 11 c€ à 40 c€ par kWh suivant la puissance crête installée. En 2012, la puissance est de l'ordre de 4 000 MW et ne contribue qu'à



Figure 18

Chauffage solaire.

0,4 % de la production électrique française.

Cette progression lente est due à plusieurs facteurs. Tout d'abord, le photovoltaïque ne fournit qu'une énergie discontinue qui nécessite soit un stockage, soit un système informatique de gestion des réseaux auxquels il est raccordé (*smart grid*) pouvant faire face aux sauts de production. C'est encore une énergie chère qui est de 3 à 10 fois supérieure au prix de l'énergie d'origine nucléaire. Les installations demandent des surfaces importantes, par exemple 4 hectares pour 1,3 MWc ou 20 m² pour 2 kWc chez un particulier.

Par conséquent, l'industrie photovoltaïque européenne est en difficulté. Photowatt en France a failli disparaître,



Figure 19

Batterie de panneaux photovoltaïques au silicium.

plusieurs sociétés implantées en Allemagne ont disparu, la politique de rachat est en cause. En Allemagne par exemple, le prix de rachat du kWh a croisé le prix de vente à partir du réseau en 2012, ce qui rend les investissements moins rentables.

Le solaire thermique, qui est déjà bien connu pour les installations d'eau chaude sanitaire largement commercialisées, est depuis quelques dizaines d'années l'objet de recherches intensives et d'installations de grande ampleur aux États-Unis et en Espagne. Le CNRS en France avait été pionnier à Odeillo, en 1983. L'échec a été dû à des corrosions de circuits du fluide caloporteur qui sont maintenant résolues. Le principe est de chauffer par concentration du rayonnement solaire, soit des tubes dans lesquels circule une huile à température de l'ordre de 300°/350°, soit une cible massive dans laquelle circule un mélange de sels fondus ($\text{NO}_3\text{K}-\text{NO}_3\text{Na}$) qui est porté à haute température et emmagasine la chaleur (Figure 20). Ces fluides caloporteurs par l'intermédiaire d'un échangeur cèdent leur chaleur à de l'eau ou de la vapeur sous pression qui fait tourner la turbine d'un géné-

rateur électrique classique. Si le volume du caloporteur est suffisant, on s'affranchit de l'intermittence de production qui peut fonctionner la nuit ou en l'absence momentanée d'ensoleillement. Nous n'avons pas encore suffisamment de recul sur ces installations pour donner le prix du kWh fourni et leur viabilité à long terme.

4.2. L'énergie éolienne

Les différences de température, d'ensoleillement, d'altitude provoquent sur la planète des échanges dans l'atmosphère qui agitent les différentes couches de l'air qui nous entoure et provoquent « le vent ». De tout temps, l'énergie du vent a été exploitée, les moulins ont parsemé la campagne jusqu'au XIX^e siècle et leurs rares ailes tournantes témoignent d'un passé que la vapeur a tué. Les éoliennes modernes répondent au même principe. Leur puissance est proportionnelle à la surface A du cercle que décrivent les pales et au cube de la vitesse du vent U , soit $P = AU^3$. La taille des éoliennes varie donc en fonction de la puissance, avec des diamètres de 70 m pour 1,5 à 2 MW et de plus de 120 m pour 5 MW (Figure 21).

Figure 20

Centrale solaire thermique en Espagne.



La chimie a fortement contribué à l'amélioration des rendements avec des pales de grande dimension en composites carbone-polymères et de nouveaux aimants NdFeB dans les générateurs électriques aux sommets de ces immenses tours.

Il est possible d'implanter des éoliennes dans les zones de développement éolien (ZDE), les plus intéressantes étant situées près des côtes de l'Atlantique, de la Manche et de la Méditerranée. L'EDF établit des contrats avec les investisseurs garantissant le rachat de la production électrique au tarif de 8,2 c€ durant une période de plusieurs années. Par ailleurs, plusieurs programmes d'implantation de « champs » d'éoliennes off-shore, notamment dans la Manche, sont en cours. Les investissements sont relativement importants, de l'ordre de 1 000 €/kW sur sol et de 2 000 €/kW off-shore en mer mais la rentabilité grâce au tarif de rachat est plutôt bonne pour les investisseurs car on estime que le prix de revient du kWh est de 6 à 10 c€.

Il reste que l'énergie éolienne comme l'énergie photovoltaïque est intermittente (Figure 22). L'éolienne commence à produire du courant au-dessus d'une vitesse du vent de 20/30 km/h et doit s'arrêter lorsqu'il atteint une vitesse supérieure à 90 km/h, son facteur de charge dépasse peu 20 %. Il faut donc pouvoir stocker l'énergie, avoir un réseau de raccordement intelligent pouvant faire face aux « à-coups » prévisibles, et créer des cen-

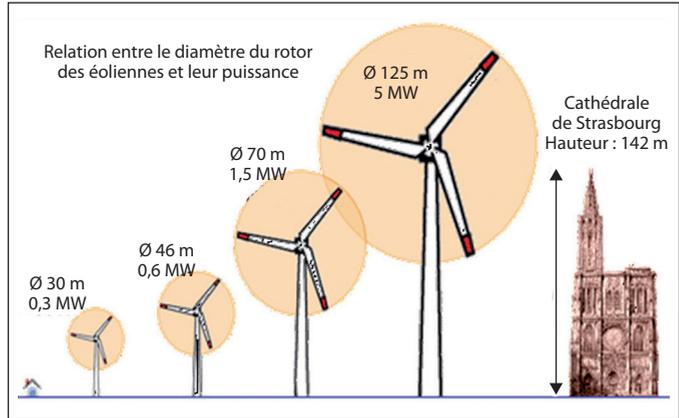


Figure 21

Tailles respectives en fonction de la puissance.

trales thermiques de remplacement pouvant prendre le relais au gaz ou au charbon comme en Espagne ou en Allemagne et au Danemark. En France, l'éolien s'est assez bien développé. Il fournit actuellement de l'ordre de 12 TWh annuellement soit 2,2 % de la production électrique nationale. Il marque un peu le pas, faute d'investisseurs et de fabricants français. Les procédures longues d'implantation, les recours contre la gêne paysagère, la surface nécessaire au sol



Figure 22

Une énergie intermittente.

Source : INRA

(l'équivalent d'une tranche nucléaire nécessiterait 1 500 éoliennes terrestres sur environ 13 000 hectares) sont les principales raisons de ce ralentissement. C'est pourquoi le gouvernement a lancé plusieurs appels d'offres pour des champs off-shore.

5 Le recyclage des matières premières

Les ressources minières obéissent au même modèle que les ressources en pétrole. Les composés des métaux ont mis des années à constituer des filons géologiques miniers et leur exploitation passe inévitablement par un sommet avant de redescendre faute de minerais. Périodiquement, nous sommes alertés par les géologues sur l'épuisement des réserves au rythme de consommation actuel ; plus de réserve d'étain Sn à 25 ans, plus d'argent Ag à 20 ans, plus de cuivre Cu à 50 ans, ce qui devrait nous sensibiliser à un « acte de terrien : le recyclage des métaux » sans lequel le développement devient impossible. Le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a publié en 2011 deux rapports « *Recycling rate of metals* » et « *Metal stocks in society* » qui montrent :

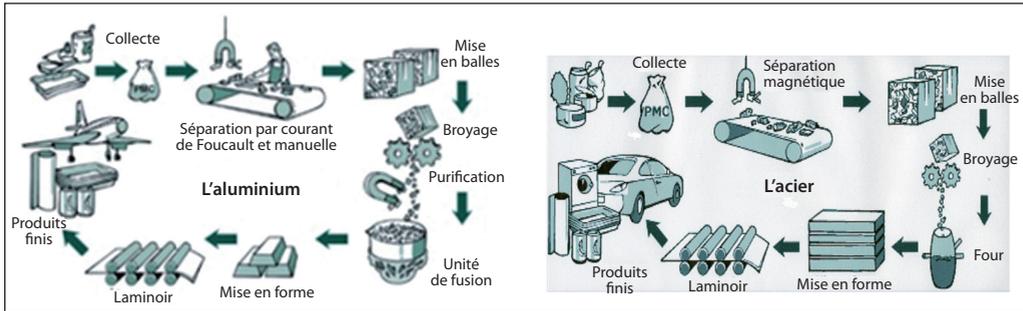
- que les taux de recyclage des métaux sont très inégaux ; si 18 atteignent plus de 50 % (Pb, Ag, Al, Fe...), 6 dépassent 10 % (Mg, Mo, W, Cd...), mais 34 ont un taux de recyclage inférieur à 1 %, beaucoup sont utilisés en électronique et dans les hautes technologies tels que Sc, Ga, les terres rares, Ta, Zr

... et certains d'entre eux sont devenus stratégiques ;

- qu'il faut utiliser maintenant les mines « hors sols » c'est-à-dire les stocks de métaux dans les villes, les immeubles, les caves, les placards... Par exemple, le cuivre des tuyauteries, des matériels électriques, des fils... qui représentent un poids par habitant non négligeable, l'équivalent pour un Français ou une Française de plus de 200 kg. Les stocks accumulés dans le monde sont considérables surtout dans les pays développés. Pour le cuivre, c'est 20 fois la production annuelle (20 × 16 MT), pour l'aluminium 13 fois (13 × 41 MT), pour le fer et l'acier 10 fois la production annuelle qui est immobilisée.

Il faut ici rappeler que le XX^e siècle a vu une exploitation minière qui a été multipliée par 27 en 100 ans, accompagnée par une mécanisation généralisée et une diminution progressive des teneurs des minerais exploités, sans oublier les fermetures des mines épuisées ou non rentables.

C'est donc le recyclage des métaux qui s'impose ou s'imposera, compte tenu de l'augmentation des cours des métaux, notamment de ceux qui sont tirés par les applications dans les hautes technologies à haute valeur ajoutée. C'est de plus une démarche d'éco-citoyen. En effet, si nous prenons le cas de l'aluminium dit de première fusion préparé par électrolyse de l'alumine Al_2O_3 en milieu cryolithique fondu, il nécessite par tonne 13 MWh et contribue à générer 11 tonnes de CO_2 alors que



l'aluminium de 2^e fusion recyclé ne nécessite que 1 MWh et génère donc 1 tonne de CO₂ soit 11 fois moins. Pour le fer, une tonne d'acier après raffinage de la fonte sortie du haut-fourneau génère un dégagement de 2 tonnes de CO₂ alors qu'après recyclage au four électrique, elle ne représente que 0,3 tonne de CO₂ soit 6 fois moins (Figure 23).

Le recyclage en France permet l'économie de 6 Mtep (million de tonnes d'équivalent pétrole) soit de l'ordre

de 3 % de la consommation d'énergie primaire. Certaines filières demandent à être réorganisées ou organisées – ramassage, triage, stockage, raffinage (TR ou Li par exemple). Dès la conception d'un produit, le cycle de vie est à prendre en compte. C'est « l'éco-conception ». Il faut sans doute reprendre ce que l'on a appelé « l'économie de guerre », celle de la pénurie, en valorisant des stocks ou des mines à faible teneur qui deviendront économiquement acceptables.

Figure 23

Principe des procédés de recyclage des métaux – aluminium et acier.

Quel avenir pour l'énergie ?

Il n'est pas possible de prévoir le coût de l'énergie avec précision, on peut seulement dire qu'il restera durablement élevé. Si les États émergents, la Chine, l'Inde, le Brésil, se mettent au niveau des États-Unis ou de l'Europe ne serait-ce qu'au nombre de véhicules pour 1 000 habitants, alors on assistera à l'explosion de la demande en carburants, le *pic oil* sera vite dépassé et on sait que ce qui est rare est cher. Pour la demande en électricité, les énergies renouvelables viendront compléter le mix énergétique mais inévitablement elles contribueront à l'augmentation des prix pour le particulier et

l'industrie qui devront investir en isolation et efficacité énergétique pour diminuer la facture. La transition énergétique, les économies d'énergie exigent de forts investissements. Seuls les particuliers, les industries et les pays riches et les gouvernements conscients et responsables pourront se le permettre.

Le coût de l'énergie et les ressources nationales des pays deviennent des enjeux géopolitiques, économiques et de défense. Ils entrent de plain-pied dans les critères de compétitivité et de concurrence économique entre pays. La crise de l'énergie peut entraîner une grande fragilité de certains pays développés. Certains mêmes y voient les ferments de conflits armés.

Pour la France, on peut souhaiter que la maxime républicaine sur le fronton des bâtiments officiels puisse être « *liberté-égalité-fraternité-sobriété* » non pas pour limiter la consommation de boissons alcoolisées mais pour réduire la consommation d'énergie des citoyens. Ils devraient donc s'approprier les slogans « *Isolez, bougez intelligemment, recyclez, innovez* », en détournant cette vieille réclame de la fin des années 1970 que les moins de vingt ans n'ont pas connue « *Le monde n'a pas de pétrole mais il a des idées* ».