

# L'impact de l'énergie sur la société future

## *Un autre monde se dessine*

par Jean-François MULLER

### Préambule

Deux citations de Galilée (1564-1642) s'imposent dans le contexte de cette communication. La première est dans le droit fil de la tentative d'imaginer le futur : « *On ne peut pas prédire le futur, mais il est possible d'inventer des futurs* ». En ce sens, les éléments de réflexion que je me propose de vous communiquer ne sont qu'une approche vers un futur possible parmi d'autres.

La deuxième citation de Galilée reflète beaucoup de bon sens et d'humilité : « *On ne peut pas enseigner quelque chose à quelqu'un, on ne peut que l'aider à le découvrir par lui-même* ». Cette aide, nous le savons bien, est d'autant plus pertinente lorsqu'elle s'adresse aux plus jeunes avides et curieux d'expériences. Ce sont les jeunes générations qui construiront le monde de demain avec notre aide à condition que nous donnions des messages clairs et exploitables.

### Nous entrons dans un autre monde !

Nous avons enfin pris conscience que notre monde est isolé dans l'espace car la probabilité de pouvoir rejoindre une planète avec des conditions de vie semblables aux nôtres est nulle. Même en supposant que nous puissions voyager à la vitesse de la lumière, une vie ne suffirait pas pour atteindre une telle cible en admettant qu'elle soit parfaitement localisée. Nous savons aussi que les ressources de la planète Terre ne sont pas illimitées et que la seule énergie réellement renouvelable c'est celle du soleil pour environ 4,5 milliards d'années ! Il y a donc encore de la marge...

Aujourd'hui nous sommes à la croisée des chemins. Notre humanité doit trouver l'équilibre entre les ressources encore disponibles et la vie économique. Cela suppose d'inventer des procédés de recyclage optimaux dans toutes les productions industrielles. En parallèle, la préservation des ressources

en eau, des terres cultivables, de la faune et de la flore devient un enjeu majeur car faisant partie de l'équilibre biologique. Il en est de même pour la forêt car elle est le poumon de la Terre.

Dans ce contexte, le rôle de la recherche et de la technologie sera omniprésent dans tous les domaines des sciences et de l'industrie. Cela ne veut pas dire pour autant que nous serons en récession économique. Le secret de la réussite d'une telle mutation résidera aussi dans notre capacité à proposer un enseignement plus libre et responsable, plus mobile et mieux adapté pour inventer et structurer avec les jeunes générations cette nouvelle civilisation, cet **autre monde** que nous savons inéluctable.

Je me propose d'aborder ce vaste sujet en prenant l'énergie comme fil conducteur alimenté par une abondante bibliographie parfois contradictoire, voire très polémique, car motivée par de nombreux enjeux politiques et industriels. Après quelques définitions et ordre de grandeurs nécessaires pour établir des comparaisons, seront traités successivement l'évolution de la consommation énergétique liée à celle de la population, quelques mots sur le réchauffement climatique avec en corollaire la sensibilité de l'atmosphère à la pollution, les modes de production de l'énergie et enfin leurs influences sur la répartition de la population, les transports et arts de vivre dans nos villes.

## L'énergie, quelques définitions et ordres de grandeurs

La puissance requise et l'énergie produite, ou consommée, font très souvent l'objet de confusions notamment dans la presse. C'est la raison pour laquelle quelques éléments de physique très simple peuvent être utiles au lecteur.

L'unité de mesure internationale de l'énergie est le joule. Un joule correspond à l'énergie nécessaire pour **déplacer une masse de 1 kilogramme sur une distance de 1 mètre avec une force capable de lui communiquer une augmentation de vitesse, c'est-à-dire l'accélération, de 1 mètre par seconde au bout d'une seconde, puis 2 mètres par seconde au bout de 2 secondes et ainsi de suite...**<sup>1</sup> Prenons la pomme chère à Isaac Newton. Une pomme de 102 grammes (soit 0,102 kg) tombant de 1 mètre produit une énergie de 1 joule. Un simple calcul le montre :

$$E = \underbrace{0,102 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2}_{\text{force de 1 newton}} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ newton} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ joule}$$

*masse                      accélération                      distance de  
   terrestre                      déplacement*

1.  $E = 1 \text{ newton par mètre} = 1 \text{ joule} = 1 \text{ kg} \times (\text{m/s})^2$ .

## *L'impact de l'énergie sur la société future*

La puissance développée se mesure quant à elle en watt : **1 watt = 1 joule par unité de temps, c'est-à-dire 1 joule par seconde**. En d'autres termes plus l'énergie est produite en un temps court, plus la puissance est élevée. Si l'on multiplie la puissance par le temps exprimé en seconde, on retrouve l'énergie exprimée en joules.

Pour des raisons pratiques, il est préférable ici d'exprimer l'énergie en kWh c'est-à-dire 1 000 Wh qui est l'unité de tous les compteurs électriques. Ainsi 1 kWh correspond à une puissance de 1 000 Watts délivrée pendant une 1 heure soit 3 600 secondes. Par conséquent 1 kWh est égal à 1 000 watts  $\times$  3 600 secondes c'est-à-dire 3,6 millions de joules ! Inversement 1 joule =  $1/3,6$  millions kWh =  $2,778 \cdot 10^{-7}$  kWh. Ce dernier chiffre permet d'établir toutes les conversions de l'énergie en kWh.

Toutefois, lorsque l'énergie délivrée ou consommée se mesure à l'échelle d'une ville, d'un pays ou d'un continent, il est judicieux d'utiliser des multiples du wattheure (Wh) :

<b>1 kWh</b>	= mille Wh	= $10^3$ Wh	
<b>1 MWh</b>	= 1 million de Wh	= $10^6$ Wh	= <b>1 000 kWh</b>
<b>1 GWh</b>	= 1 milliard de Wh	= $10^9$ Wh	= <b>1 million de kWh</b>
<b>1 TWh</b>	= 1 million de millions de Wh	= $10^{12}$ Wh	= <b>1 milliard de kWh</b>

À titre d'exemple, en 2008 la production annuelle mondiale d'électricité est de 20 000 TWh, celle de la France de 544 TWh, et enfin celle de l'Usine d'Électricité de Metz (UEM) de 1,7 TWh. Cette échelle de grandeurs illustre les écarts : le territoire mosellan desservi par l'UEM représente 0,85 dix millièmes de la production mondiale !

Pour établir des comparaisons entre les différents modes de production d'énergies, les économistes ont défini une nouvelle unité appelée la tonne équivalent pétrole (Tep). Elle correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen ce qui représente environ 11 630 kWh. Il est alors aisé d'établir les correspondances avec les autres combustibles couramment utilisés.

1 tonne de bois	= 0,3 Tep	= 3 480 kWh
1 tonne de charbon	= 0,6 Tep	= 6 960 kWh
1 000 m <sup>3</sup> de gaz naturel	= 0,88 Tep	= 10 280 kWh
<b>1 tonne de fioul/gasoil</b>	<b>= 1 Tep</b>	<b>= 11 630 kWh</b>
1 tonne de kérosène	= 1,03 Tep	= 11 987 kWh
1 tonne d'essence	= 1,05 Tep	= 12 180 kWh

Prenons l'exemple d'une habitante du Sahel, qui chaque jour ira chercher 4 kg de bois mort pour sa cuisine :  $4 \text{ kg} \times 365 \text{ jours}$  équivaut à 1,46 tonne/an. Ce chiffre multiplié par son équivalent en kWh (3 480) équivaut à une consommation d'énergie de 5 080 kWh/an !

Encore une petite échelle de valeurs pour compléter l'exemple précédent : la consommation d'énergie d'une famille (couple avec deux enfants) vivant dans un appartement<sup>2</sup> de 75 m<sup>2</sup> consommant 110 kWh/m<sup>2</sup>/an sera de 8 250 kWh/an. Dans le même esprit, un véhicule moderne, consommant en moyenne 7 litres de gasoil par 100 km et effectuant 17 000 km/an, dépense environ 10 655 kWh/an (soit 1 050 litres)<sup>3</sup>. Si le couple possède une deuxième voiture de ville (7 000 km/an), la dépense d'énergie du couple se situera autour de 20 000 kWh/an. Dans un tel cas, la plus grande part d'énergie consommée correspond aux véhicules.

Il est intéressant de mesurer dans ce contexte l'apport et l'intérêt de l'énergie nucléaire par rapport à tous les autres modes d'énergie. Ainsi une tonne d'uranium enrichi à 3,7 % (fission nucléaire) produit avec un rendement faible de 35 % environ 25 800 Tep soit 295 millions de kWh (cf. note n° 1). La France, grâce au programme électronucléaire voulu par le gouvernement de Giscard d'Estaing après la première crise pétrolière en 1974, assure de ce fait son indépendance énergétique. Elle est la championne toute catégorie en matière de faible émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la surface de ses forêts a augmenté au cours des trente dernières années. Certes, cela nécessite une organisation sans faille et un niveau de technicité très élevé pour maîtriser le traitement des déchets radioactifs et leur enfouissement en toute sécurité.

## L'évolution de l'énergie dans le monde

Au vu des chiffres précédents on saisit mieux pourquoi l'homme préhistorique (homo sapiens) a pu émerger dans le monde animal grâce à la maîtrise du feu et devenir très vite le premier prédateur de la planète. « La guerre du feu »<sup>4</sup> de Joseph-Henri Rosny illustre fort bien cette transition dans l'histoire de l'humanité. Lorsque 50 à 60 000 ans plus tard, des civilisations plus évoluées ont commencé à se fixer en Babylonie et en Égypte, ce n'est pas le fruit du hasard. Ces deux contrées bénéficiaient de l'exceptionnelle conjonction des deux éléments nécessaires à la vie que sont un ensoleillement généreux (l'énergie fondamentale) et l'eau en abondance fertilisant la terre par les limons entraînés en amont. La biomasse nécessaire pour se nourrir et disposer de chauffage d'appoint était en abondance relative. Il n'est pas étonnant que « Râ » source de vie fût le grand dieu solaire d'Héliopolis et de la plupart des villes de l'Égypte ancienne. Corollairement, « Hapy », le génie du Nil, a personifié l'inondation annuelle et la fécondité apportée par le fleuve-dieu.

---

2. Chiffre correspondant à un immeuble correctement isolé.

3.  $0,916 \text{ tonne} \times 11\,600 = 10\,655$  (sachant que densité du gasoil est égale à 0,77).

4. J.-H. Rosny, « La guerre du feu » réédition Nathan (1995).

## *L'impact de l'énergie sur la société future*

Dès l'âge du bronze, la combustion en foyer d'argile permit l'essor des céramiques et la métallurgie des métaux nobles tels que l'or, le cuivre, le zinc, le plomb et leurs alliages. Avec l'âge du fer, les foyers à soufflet émergèrent permettant une augmentation de la température nécessaire pour obtenir des lames en fer par martelage. Jusque-là, l'énergie faisait appel essentiellement à la biomasse, c'est-à-dire à la forêt. Ce n'est qu'avec les premières exploitations du charbon en Angleterre au début du XVII<sup>e</sup> siècle qu'apparurent les haut-fourneaux, fort rudimentaires par rapport à ceux plus modernes qui subsistent encore aujourd'hui à Hayange par exemple. Il a fallu attendre le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle pour que la sidérurgie et l'exploitation des mines de charbon prennent leur essor et avec elles la société industrielle.

La course à l'énergie était née. L'exploitation effrénée des combustibles fossiles commença avec le charbon puis, au début du XX<sup>e</sup> siècle, celle du pétrole au Texas, ensuite celle des schistes bitumineux provisoirement abandonnée pour des raisons économiques pour être reprise récemment au Canada et enfin dans les années soixante le gaz naturel.

Les combustibles fossiles sont le résultat de la transformation progressive de la matière végétale des immenses forêts et marais du tertiaire et du quaternaire par action bactérienne aérobie ou anaérobie. Après leur enfouissement par les sédiments, leur lente maturation sous l'effet de l'augmentation de la pression et de la température a conduit notamment aux différentes variétés de pétroles et de charbons.

En d'autres termes, en brûlant les combustibles fossiles (gaz, pétrole, tourbe, lignite, schiste bitumineux, charbon) l'humanité consomme la biomasse générée par photosynthèse et accumulée au cours de plus de 400 millions d'année ! En fait, c'est un précieux stock d'énergie solaire qui part trop vite en fumée. En cent cinquante ans, selon les experts, plus du tiers des réserves mondiales aurait été épuisé.

### *L'évolution de la population mondiale et ses effets*

Cette capacité récente d'exploiter à grande échelle « l'or noir solaire stocké » explique l'évolution rapide de la population mondiale, à la fois par la possibilité de construire plus vite et plus haut (l'industrie cimentière est des plus « énergétivores ») tout en offrant un confort amélioré et par conséquent une espérance de vie accrue.

Au 28 février 2010, la population mondiale était estimée à 6,846 milliards d'habitants avec un accroissement journalier actuel d'environ 200 000 personnes !

Ceci n'est pas sans conséquence sur l'avenir de notre planète avec d'une part l'épuisement des ressources végétales et minérales, d'autre part

l'accroissement de la pollution de l'atmosphère et de l'hydrosphère (eau de mer et eau douce). Maîtriser cet emballement ne sera pas simple tant l'avidité mène le monde !

Si l'on considère en premier lieu les surfaces agricoles exploitables c'est-à-dire couvertes d'humus biologiquement vivant (avec des vers de terre et de multiples bactéries), l'Égypte est à ce titre un très bon exemple. Au temps des grandes pyramides, la population de l'Égypte a été évaluée par plusieurs auteurs à entre 600 000 et 800 000 habitants. Il y a plus de 4 000 ans, le désert n'était pas aussi aride qu'aujourd'hui puisque de très nombreuses peintures sur enduits relatent les exploits des chasses pharaoniques. Par contre, les surfaces cultivées étaient très voisines de celles existant aujourd'hui c'est-à-dire essentiellement le delta et la longue vallée du Nil. Cela représentait environ 36 000 à 40 000 km<sup>2</sup>. Cela veut dire qu'au temps des pharaons, un km<sup>2</sup> permettait de nourrir *20 habitants*. Aujourd'hui la surface totale de l'Égypte est de 1 million de km<sup>2</sup> dont 95 % de déserts arides pour 83 millions d'habitants (100 fois plus). Les surfaces cultivables actuelles sont évaluées, selon les statistiques disponibles, entre 50 et 60 000 km<sup>2</sup>, guère plus. Cela signifie qu'1 km<sup>2</sup> nourrirait aujourd'hui environ *1 380 habitants* ! Toutefois, l'irrigation constante des terres par les lâchers d'eau réguliers du grand barrage d'Assouan permet trois récoltes successives pour une même terre. Le revers de la médaille est un appauvrissement, voire une réduction des terres cultivables par abus d'engrais chimiques. Si le gouvernement égyptien en échange du tourisme n'importait pas massivement des produits agricoles, ce serait sans doute la disette<sup>5</sup>. À titre de comparaison la France comporte 290 000 km<sup>2</sup> de surfaces cultivables (54 % du territoire) et peut nourrir ainsi *217 habitants/km<sup>2</sup>*. En fait, l'agriculture française est exportatrice et contribue aussi à l'entretien des paysages. N'oublions pas l'aphorisme de Sully<sup>6</sup>.

Si ce type d'approche est étendu à toute la terre, il est possible d'évaluer la limite de population que la planète bleue peut théoriquement supporter : la surface terrestre est de 510 millions de km<sup>2</sup> dont 133,6 millions de terres immergées dont seuls 18 % à 20 % sont cultivables, soit 25 millions de km<sup>2</sup>. Si l'on reprend le chiffre de 6,846 milliards d'habitants, un simple calcul indique qu'un km<sup>2</sup> (100 hectares) de terres cultivables nourrit actuellement 285 habitants, en 2050 ce sera 346 si la population mondiale atteint le chiffre de 9 milliards d'habitants. Au rythme moyen d'augmentation de 150 000 habitants/jour, la population mondiale dans quatre siècles pourrait atteindre 30 milliards d'habitants. Ceci équivaldrait à nourrir *1 200 habitants/km<sup>2</sup>* ! Notre planète ne pourrait sans doute pas le supporter. Parallèlement, les surfaces

---

5. Le barrage d'Assouan prive les berges du Nil du limon qu'apportaient les crues du Nil.

6. Labourage et pâturage sont les deux mamelles de la France.

cultivables ont plutôt tendance à diminuer car l'agriculture intensive<sup>7</sup>, par épandage massif d'engrais azotés et phosphatés, minéralise les sols les rendant sensibles à l'érosion<sup>8</sup>. C'est la raison pour laquelle de nombreux spécialistes s'accordent à dire qu'une population comprise entre 8,5 et 10 milliards de personnes constituerait une asymptote naturelle. Cette seule approche soulève quantité de problèmes éthiques redoutables qu'il faudra sans doute bien aborder un jour ou l'autre. Quelles que soient les hypothèses, il est illusoire d'imaginer ce que pourra être l'humanité dans trois ou quatre siècles !

### ***La production annuelle de l'énergie au regard de l'énergie solaire reçue par an***

Cette approche a le mérite de donner un ordre de grandeur permettant d'avoir une idée de l'effet anthropique<sup>9</sup>. Ce n'est qu'un repère indicatif.

La puissance du rayonnement solaire absorbée par la terre est de 235 watts par m<sup>2</sup>. La communauté scientifique n'a pas remis en cause ce chiffre. De nombreuses mesures l'attestent. Ceci représente une énergie de 1 029 kWh/m<sup>2</sup>/an (le soleil n'éclaire en moyenne que 12 heures par jour au 45<sup>e</sup> parallèle). Connaissant la surface du globe (vide infra page 270), il est aisé de calculer l'énergie reçue en une année : *525 millions de TWh/an* !

Or l'énergie produite, toutes origines confondues (pétrole et dérivés, charbon, gaz ainsi que la fission nucléaire), est d'environ 100 000 TWh/an en 2008, dont 20 000 TWh correspondent à la production mondiale d'électricité. À cela, s'ajoute l'énergie dégagée par les êtres vivants pendant la même période. Elle se situe autour de 20 000 TWh/an sachant qu'un humain a une puissance calorifique de 0,1 watt, celle d'un ovin est à peu près équivalente tandis que celle d'un bovin est dix fois supérieure. Autrefois, nos paysans le savaient fort bien puisqu'ils s'arrangeaient pour vivre au-dessus de l'étable afin de bénéficier de cet apport calorifique<sup>10</sup>. L'énergie anthropique se situe donc aujourd'hui autour de *120 000 TWh/an +/- 5 000 TWh/an*.

- 
7. Dans les années 30, 20 à 30 kg d'azote était épandu à l'hectare, aujourd'hui en Beauce c'est 10 fois plus !
  8. Certains experts évaluent la perte de sols fertiles à 10 tonnes/an/hectare ! Partout le Sahara dans 3 siècles !
  9. Anthropique : engendré par l'homme.
  10. En 2008, la population ovine est d'environ 1,7 milliard de têtes, tandis que celle des bovins est estimée à 1,5 milliard.

À partir de ces deux chiffres soulignés précédemment, le rapport est significatif : 120 000 TWh/525 000 000 TWh c'est-à-dire 2,3/10 000. L'activité des êtres vivants se situe environ à 2,3 *dix millièmes* de l'énergie solaire reçue en un an. C'est l'ordre de grandeur qui importe, même s'il est relativement imprécis.

Ce chiffre mérite attention. En première analyse, il serait indéniablement en faveur d'un faible impact anthropique dans le contexte du réchauffement climatique. En réalité, ce n'est pas si simple, *car l'atmosphère, cette fine pellicule de gaz qui nous protège et nous fait vivre*, se révèle, comme nous allons le voir, être un système complexe *beaucoup plus sensible* qu'on ne le pensait aux émissions qu'elles soient naturelles comme celles d'un volcan ou anthropiques comme celles des grandes mégapoles.

### **Le réchauffement climatique. Réalité ou fiction ?**

La difficulté du sujet est à la mesure de l'abondante littérature qui lui est consacrée, laquelle est au cœur des nombreuses polémiques actuelles. Ainsi, même les modèles et calculs réalisés sur les plus gros ordinateurs ne permettent pas de prévoir le temps plus de cinq jours à l'avance. Il est toutefois possible de *donner des points de repères difficilement contestables*.

Sur les cinquante dernières années, il est indéniable qu'un certain nombre de phénomènes aisément observables se sont produits : recul généralisé des glaciers dans les Alpes, château d'eau de toute l'Europe, relèvement de l'altitude à partir de laquelle la neige tient durablement en hiver, diminution alarmante de la banquise arctique, précocité des vendanges dans toutes les régions viticoles, recul vers le nord de la limite du permafrost rendant les forêts « ivres »<sup>11</sup>.

De plus, dans la même période, les épisodes caniculaires se sont multipliés et celui de l'été 2003 dans l'hémisphère nord a été particulièrement significatif et dramatique à plus d'un titre. Cette année-là, la Baltique, mer intérieure très polluée par tous les pays riverains était devenue une soupe tiède, sorte de gigantesque bouillon de culture presque totalement recouverte d'algues. Pendant la nuit, je m'en souviens, notre bateau revenant de Saint-Petersbourg, fendait les flots d'une mer devenue fluorescente. C'était beau et inquiétant tout à la fois. Dans le même temps, la plupart des forêts européennes et sibériennes avaient littéralement « grillé ». La couleur ocre d'or de l'automne dominait le vert en ce mois d'août 2003. Les photographies satellitaires prises

---

11. Le dégel en profondeur des terres provoque la déstabilisation de la forêt arctique qui se traduit par un enchevêtrement des troncs d'arbres dans tous les sens.



**Figure 1.** Un bel arbre comme celui-ci comporte environ un million de feuilles, chacune d'elles étant une merveilleuse petite usine chimique qui, absorbant le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), fabrique de la cellulose et rejette de l'oxygène.

à différentes longueurs d'onde ont révélé l'ampleur du phénomène. Les arbres étaient en quelque sorte asphyxiés et n'absorbaient plus le  $\text{CO}_2$  pour la photosynthèse avec fabrication de cellulose et rejet d'oxygène.

Chaque feuille d'arbre est en effet une merveilleuse nano-usine chimique à biomasse essentielle à la fois pour notre nourriture et notre chauffage. Nombre de chimistes dans le monde tentent de comprendre les mécanismes subtils de la photosynthèse afin de recréer *in vitro* la fabrication de la cellulose et piéger du même coup l'excès de  $\text{CO}_2$  (cf. figure 1 ci-dessus).

Un arbre, une vie, quel merveilleux et véridique slogan !

Alors, si de telles canicules se répétaient trois ou quatre années de suite, les forêts s'assècheraient et seraient le théâtre de gigantesque incendies entraînant l'érosion puis la désertification. Dernièrement ceux de Californie et

d'Australie<sup>12</sup>, suite à de très fortes températures estivales, renforcent l'inquiétude des habitants de ces contrées lointaines. À cela s'ajoute la déforestation volontaire pour créer de nouvelles terres agricoles.

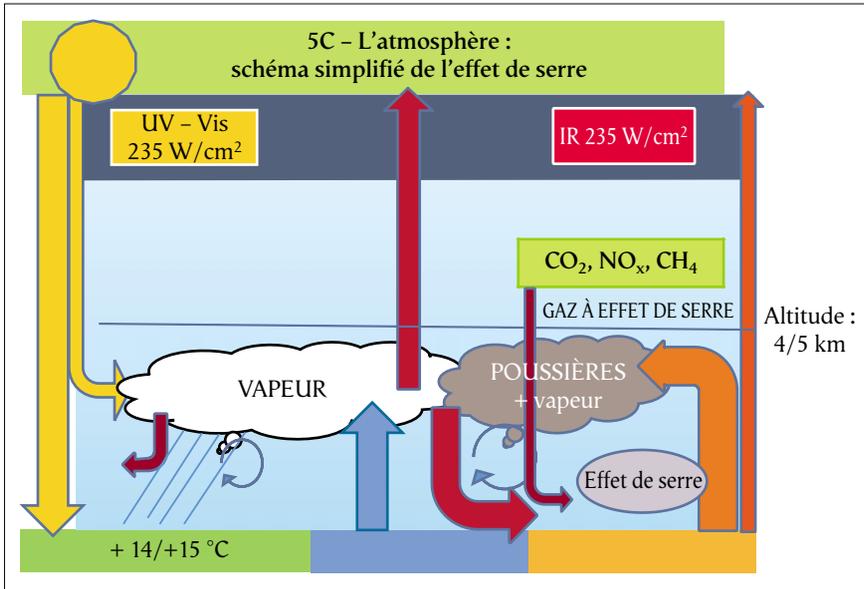
Bref, tous ces éléments ajoutés les uns aux autres laissent à penser que nous assistons à un réchauffement climatique. L'homme en est-il responsable ? Le débat est loin d'être tranché tant la géophysique de l'atmosphère mérite d'être approfondie. Si le rôle de la vapeur d'eau dans l'effet de serre est compris depuis longtemps (cf. figure 2) (la température moyenne du globe est de 14 °C en atmosphère humide alors que si elle était sèche elle serait de -19 °C) d'autres facteurs que ceux des autres gaz à effet de serre mis en cause actuellement (CO<sub>2</sub>, méthane et oxydes d'azote) (cf. figure 2) peuvent interférer. Parmi eux, il y a très vraisemblablement l'accumulation des particules qu'elles soient naturelles ou issues de tous les processus de combustion. Prenons un exemple parmi d'autres :

– lors de l'explosion du Pinatubo en 1991, plus de 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre ont été projetées à très haute altitude (environ 40 km). Ce gaz, au contact des très fines particules issues du volcan et avec l'humidité naturelle de l'atmosphère, s'est transformé en acide sulfurique puis en sulfates de sodium et de potassium. Ces particules sont devenues ainsi très réfléchissantes. Du coup, une plus grande part du rayonnement solaire a été renvoyée vers l'espace, ce qui s'est traduit par une baisse significative de la température moyenne du globe dans les deux années qui suivirent cette catastrophe naturelle. Que peuvent représenter 20 ou même 30 millions de tonnes de poussières éjectées au regard de la masse totale de l'atmosphère, hors vapeur d'eau, soit 5 150 terra-tonnes ? Presque rien du tout : 4 *milliards* ! Et pourtant la perturbation fut observée par un satellite qui mesure la teneur en vapeur d'eau de la stratosphère elle-même en relation avec la température (cf. figure 2). Ceci illustre parfaitement l'extrême sensibilité de l'atmosphère.

Or, chaque année, environ 6,6 milliards de tonnes de carbone sont consommées dont une bonne part se retrouve sous forme de microparticules qui, plus elles sont fines, mettent plus de temps à retomber sur le sol. Cette fois le rapport est environ 1 000 fois plus élevé que le précédent ! Toutes ces particules, si visibles quand un avion s'élève au-dessus d'une mégapole comme Paris ou Londres, ont un double effet. Elles filtrent une partie de la lumière ce qui se traduit par un certain refroidissement au sol. Dans le même temps, elles absorbent une partie du rayonnement en tant que corps noir. Le

---

12. Le 15 mars 2010, une émission de la télévision australienne ABC News mentionnait une étude de scientifiques australiens selon laquelle la Terre s'est réchauffée de 0,7 °C au cours des cinquante dernières années. Voir également les gigantesques incendies pendant l'été 2010 en Russie.



**Figure 2.** Schéma simplifié de l'effet de serre : le rayonnement solaire dans le domaine du visible et de l'UV est en équilibre avec le rayonnement Infra Rouge renvoyé par la Terre. C'est essentiellement la vapeur d'eau de la basse troposphère ( $h < 4/5 \text{ km}$ ) qui permet de maintenir une température moyenne du globe autour de  $14 \text{ °C}$  au lieu de  $-19 \text{ °C}$  si l'atmosphère était sèche. Les gaz à effet de serre tels que  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{NO}_x$  n'absorbent le rayonnement Infra Rouge que dans la haute troposphère ( $h > 4/5 \text{ km}$ ). L'évaporation de l'eau refroidit, la condensation de l'eau émet de la chaleur. Les fines particules filtrent le rayonnement solaire mais absorbent une partie du rayonnement Infra Rouge. Les mouvements de l'atmosphère qui en résultent sont si complexes qu'il est fort difficile de les modéliser correctement.

réchauffement qui s'ensuit est ensuite transféré par contact avec les molécules d'air environnantes, c'est-à-dire l'atmosphère. Cet effet inverse est très difficile à évaluer tant il y a de situations variées. Mais, quand il fait chaud et qu'il n'y a pas de vent, il renforce l'impression d'étouffer.

Bref, établir à l'échelle du globe des modèles fiables permettant de prévoir l'effet de toutes ces pollutions, variables selon les lieux, reste pour l'instant un défi scientifique. Cependant, les mesures notamment réalisées à l'aide des satellites donnent bien la tendance (cf. figure 2). À l'heure actuelle, l'élévation moyenne de la température terrestre est de  $0,7 \text{ °C}$ . La mesure satellitaire est globalement en accord avec celle relevée par toutes les stations météorologiques présentes dans le monde. En parallèle, l'accroissement des déserts notamment dans les zones sahéniennes ainsi que la diminution de la

calotte arctique sont des faits parfaitement mesurables. De ce fait, on comprend mieux que la maîtrise des réserves d'eau douce, compte tenu de l'accroissement de la population, devienne un enjeu majeur qui préoccupe l'Europe et bien plus les nombreux pays environnés de déserts. L'eau sera peut-être la cause directe ou indirecte de conflits futurs.

L'eau est essentielle pour la vie. Nous le savons tous. Mais elle est aussi précieuse pour la production d'énergie. C'est la source froide des chaudières, qu'elles soient conventionnelles (bois, charbon pétrole ou gaz) ou nucléaires. Un exemple parmi d'autres. Fin 2004, après deux années chaudes et sèches, les réserves hydrauliques étaient au plus bas en Lorraine. Le débit de la Moselle était si faible qu'il fallut le maintenir artificiellement en libérant les eaux de réserve du barrage du Grand Pré dans les Vosges afin d'avoir suffisamment d'eau pour les quatre aéro-réfrigérants de la centrale de Cattenom, de manière à ne pas trop élever en aval la température de la rivière. Au bout de quelque temps de ce régime, le niveau du barrage étant lui-même très bas, une réduction de la production des centrales conventionnelles au charbon (Pont-à-Mousson, La Maxe et celle de l'UEM) fut nécessaire afin de privilégier le fonctionnement de la centrale nucléaire. Arrêter, ne serait-ce qu'une seule tranche de cette dernière, est une opération économiquement lourde. Ceci explique mieux que tous les discours pourquoi un certain nombre de centrales nucléaires actuelles ou futures (en particulier l'EPR de Flamanville) ont été implantées en bord de mer. La source froide y sera toujours présente<sup>13</sup>.

## **Les modes de production de l'énergie**

Selon les principales sources documentaires, les réserves potentiellement disponibles, qu'elles soient exprimées en milliards de tonnes équivalents pétrole (Tep) ou en TWh, sont difficilement vérifiables et révèlent des écarts importants. Une grande prudence s'impose. Toutefois, là encore ce sont plutôt les fourchettes de chiffres qui permettent de donner une tendance. En effet, selon les sources d'information, de nombreux écarts sont observés. Ce n'est pas vraiment étonnant, car pour de nombreux États ou multinationales ces données sont stratégiques, voire strictement confidentielles. Les indications reportées dans le tableau ci-après sont les plus récentes publiées sur Internet en tenant compte d'autres estimations datant des années 2005/2007<sup>14</sup>.

---

13. La température au fond de la fosse Marianne (-11 000 m) augmente doucement mais continûment.

14. BP Statistical Review of World Energy 2009 (chiffres 2008) (<http://www.bp.com/proclanding.do>); [http://fr.wikipedia.org/wiki/ressources\\_et\\_consommation](http://fr.wikipedia.org/wiki/ressources_et_consommation). Les données en italique sont hypothétiques.

## L'impact de l'énergie sur la société future

Combustibles	Réserves mondiales en GTep	Production annuelle en GTep	Nombre d'années de production
Pétrole (état actuel)	172 GTep (18 %)	3,5 - 4 (43 000 TWh)	40 - 50
<i>Pétrole (réserves ultimes)</i>	<i>410 GTep (33 %)</i>	/	80 - 140
Gaz naturel	160 GTep (19 %)	2,8 - 3 (30 000 TWh)	60 - 100
Charbon	580 GTep (60 - 70 %)	3 - 3,3 (22 000 TWh)	150 - 200 <sup>1</sup>
Uranium	30 GTep (3 %)	0,60 - 0,65 (7 000 TWh)	50 - 70
<i>Combustibles fissibles (U, Pu et Th)<sup>2</sup></i>	<i>65-70 GTep (5 %)</i>		120 - 17
		<b>Total : 102 000 TWh/an environ</b>	

1. D'autres sources font état de réserves beaucoup plus importantes, entre 300 et 700 ans.  
 2. Uranium pronostiqué, Plutonium (surgénérateur), Thorium dont les réserves sont proches de celle de l'uranium.

Au vu de ces chiffres, il apparaît que les réserves mondiales<sup>15</sup> en gaz et en pétrole accessibles devraient être suffisantes au moins pour une cinquantaine d'années. Pour ce qui concerne le charbon, les avis divergent beaucoup. Il en est de même pour les pétroles profonds difficilement accessibles et les schistes bitumineux. Par ailleurs, les chiffres relatifs aux combustibles de la fission nucléaire sont également peu fiables et doivent être considérés avec beaucoup de prudence.

Ceci dit, il resterait 2 à 3 siècles de production assurés. C'est très peu à l'échelle des temps géologiques ! Il en est de même pour la plupart des éléments de la croûte terrestre (plomb, zinc, argent, cuivre, etc.).

Cela signifie qu'il nous reste environ une centaine d'années pour mettre au point la fusion nucléaire et surtout pour améliorer la production et le stockage de l'énergie solaire. C'est dans ce dernier domaine que la marge de progression est potentiellement la plus élevée car le silicium présent naturellement sous forme de silice est avec le fer un des éléments majeurs de la croûte terrestre. Aujourd'hui, le rendement de la conversion de la lumière en électricité par des panneaux photovoltaïques est d'environ égale à 12-14 % si l'on

15. Les combustibles dits renouvelables ne sont pas décomptés : la biomasse a un bilan neutre, mais les réserves ne sont pas inépuisables, l'hydraulique et l'éolien dépendent du climat et de la situation géographique, la géothermie (sol profond) dépend de la localisation. Seule l'énergie solaire est inépuisable.

utilise du silicium amorphe. Avec du silicium monocristallin en couche très mince, il sera possible dans un proche avenir d'atteindre 20-22 %. Des recherches en laboratoire menées récemment en Californie ont permis d'atteindre des rendements plus élevés (proches de 50 %), ce qui ouvre des perspectives très encourageantes pour l'avenir. Dans le même temps, la métallurgie du silicium, autrefois très consommatrice d'énergie, s'est améliorée tant en terme de procédés qu'en terme de purification. Résultat : les coûts diminuent.

Par contre, la fusion nucléaire (cf. note n° 2) pour produire industriellement de l'électricité n'est encore qu'une perspective futuriste. Toute prospective ne pourra être raisonnablement donnée que lorsque les essais du projet « ITER » construit à Cadarache auront fait leurs preuves, notamment celle d'être industrialisables. Pour l'instant, ce n'est pas encore pour demain. Actuellement, le record mondial de durée de la réaction de fusion est, à ce jour, de 6 minutes et 30 secondes. Il a été obtenu par le Tokamak français « Tore Supra » en 2003 ! L'objectif d'ITER vise dans un premier temps à maintenir les réactions de fusion dans le plasma pendant au moins 1 000 secondes (soit 16 minutes 40 secondes). Dans ce cas, pour une puissance fournie de 50 mégawatts, la puissance obtenue serait multipliée par cinq (250 mégawatts). Un long chemin reste à parcourir !

Le soleil est donc notre meilleur espoir et c'est lui qui va guider nos projections pour envisager l'avenir de nos villes et celui de nos campagnes. Nous y reviendrons.

Dans un avenir plus proche, la stratégie industrielle de la France et par conséquent celle de l'usine d'électricité de Metz qui en dépend à 80 %<sup>16</sup>, consiste en un mélange judicieux de sources d'énergie, dont la plus grande part, soit 76 %, correspond à l'énergie nucléaire (dans le monde, elle ne représente que 3,7 %). Toutes les autres sources, y compris renouvelables, sont des appoints mobilisables en fonction de la demande et de leur temps de mise en route. Ainsi, la régulation des vannes de nos nombreux barrages hydrauliques est quasi immédiate (à condition d'avoir de l'eau), une centrale à gaz peut être mobilisée en moins de deux heures, celles au fioul lourd également. Pour une centrale à charbon, une demi-journée est en moyenne nécessaire. Par contre, une usine d'incinération des ordures ménagères fonctionne en continu sauf accident. Si elle produit de la vapeur pour l'électricité, elle entre dans la part énergétique non modulable. C'est le cas à Metz avec la liaison vapeur entre l'usine d'incinération et l'UEM. Il en est de même pour la conversion de la biomasse par fermentation des déchets végétaux en méthane. En ce qui concerne l'énergie éolienne, elle ne peut constituer qu'un appoint conjoncturel. L'absence de vent peut être brutale. En cas de défaillance, leur apport doit être rapidement compensé par de l'énergie thermique conventionnelle au risque

---

16. L'UEM ne produit que 20 % de son énergie électrique, le reste provient d'EDF.

de déséquilibrer les réseaux de distribution avec la conséquence d'une panne généralisée. En effet, à chaque instant, la production d'électricité doit être en mesure de suivre la demande.

De ce fait, dans un avenir à moyen terme (trente prochaines années), la production énergétique doit privilégier la cogénération ce qui signifie que l'alimentation d'un réseau d'électricité doit être combinée à celle d'un réseau de chaleur sous forme de vapeur à 110 °C. L'infrastructure nécessite la mise en place de tuyaux enterrés à double paroi, c'est-à-dire parfaitement isolés et protégés. En complément, il est aujourd'hui possible d'y ajouter un réseau de frigories pour l'été mais uniquement dans le cas de nouveaux quartiers. Ainsi les rendements globaux peuvent être significativement améliorés (75 à 80 %). À ce titre, à Metz, l'UEM mérite d'être citée en exemple car elle est un modèle d'intégration énergétique en prise directe avec sa clientèle locale tout en étant reconnue sur le plan national.

## **L'adaptation des villes et des campagnes à l'économie d'énergie**

Prenons un simple exemple : vous habitez en ville dans un appartement de 3 pièces au sein d'un grand immeuble mal isolé alors que la température extérieure est très inférieure aux normales saisonnières ( $T < -15\text{ °C}$ ). La demande énergétique est à son maximum. En cas de panne électrique généralisée (le risque zéro n'existe pas) vous êtes quasi sans défense. Il vous reste la cuisinière à gaz et éventuellement un chauffage radiant alimenté par le butane. On peut imaginer ce que serait la situation en cas de crise grave avec pénurie prolongée en gaz et en pétrole. Le programme pour minimiser de tels effets réside essentiellement dans notre pouvoir d'anticipation tant que les énergies traditionnelles sont encore accessibles et à un coût raisonnable. Pour fixer les idées, un appartement ancien en centre ville au deuxième étage consomme, selon l'isolation, entre 80 et 100 kWh/m<sup>2</sup>/an. Une maison individuelle mal isolée consomme entre 200 et 250 kWh/m<sup>2</sup>/an. Une maison individuelle bien isolée se situera plutôt autour 120 et 160 kWh/m<sup>2</sup>/an tandis qu'une maison considérée comme HQE (Haute Qualité Environnementale) verra sa consommation être inférieure à 75 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le nec plus ultra est bien sûr une maison passive ( $< 10\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ ) voire active c'est-à-dire productrice en énergie. De nombreux exemples ont été cités dans toute la presse. Faites votre calcul et vous saurez où vous vous situez.

Pour atteindre ainsi de bons niveaux de performances, la ville du futur, ou plus généralement les structures de la vie sociale entre centre ville et périphérie, devront prendre en compte trois éléments fondamentaux : un minimum de pollutions dans le chauffage et les transports, une protection des paysages et des zones naturelles, une présence constante de l'agriculture insérée entre agglomérations et villages. En ce qui concerne l'habitat proprement dit, il y a également trois recommandations essentielles :

- Une parfaite isolation en alternant des matériaux différents, légers et résistants que ce soit pour les murs et les ouvertures.
- Une circulation silencieuse de l'air entre les zones ensoleillées plus chaudes et les plus froides en fonction de l'orientation.
- Et au minimum deux sources énergétiques indépendantes.

En ce qui concerne les nouvelles habitations, même pour les gratte-ciels, la recherche de la quasi indépendance énergétique prendra une importance accrue en combinant les énergies éoliennes et solaires, toutes deux intégrées dans le bâtiment avec bien entendu le stockage de l'énergie par batterie avec en plus, par sécurité, les divers branchements aux réseaux existants. De tels concepts sont en voie d'achèvement notamment en Chine. C'est le cas de cette tour futuriste qui domine de 310 mètres de Guangzhou près de Canton. Elle sera totalement autonome en énergie. Ainsi, l'édifice mise sur sa façade aérodynamique orientée et conçue pour capter et accélérer les vents dominants afin qu'ils s'engouffrent dans deux fentes horizontales équipées d'éoliennes carénées. En plus de nombreuses surfaces des façades comporteront des panneaux solaires de dernière génération.

Il est donc possible, dans ces deux domaines que sont l'éolien et le solaire, de proposer des solutions viables et intégrables directement dans un immeuble sans que ce soit pour autant ni laid ni trop cher. De plus, les recherches à la fois technologiques et fondamentales laissent entrevoir de nombreux développements qui pourront être adaptés dans les pays industrialisés ou dans ceux qui sont en voie de développement comme ceux de l'Afrique.

En ce qui concerne l'éolien<sup>17</sup>, il existe déjà des micro-éoliennes dont l'axe est vertical. Les paliers sont magnétiques afin de minimiser les frottements et l'axe de rotation est doté de pales en matériaux composites légers et calculées par ordinateurs qui profitent du moindre souffle de vent. L'ensemble est caréné avec des ouvertures variables pour réguler la force du vent en cas de tempête. De telles installations peuvent trouver leur place sur de nombreux toits d'immeubles comme le sont les ventilations mécaniques contrôlées (VMC) d'aérations d'aujourd'hui. Toutefois, elles sont plus volumineuses qu'une VMC. Elles sont couplées à de petits alternateurs pour la production d'électricité. Bien entendu, ces prototypes sont encore coûteux car produits à faible échelle et surtout l'électricité produite ne peut être raccordée au réseau, compte tenu de la réglementation actuelle. Récemment, une « start-up » alsacienne<sup>18</sup> propose une petite éolienne qui peut être placée en façade de toiture. C'est un premier pas astucieux car le concept est discret, esthétique et peut

---

17. La Californie fourmille de projets innovants en matière d'énergie éolienne.

18. Société Aeolta, SAS - Alsace.

s'intégrer dans de nombreuses toitures. Un tel système, couplé à des batteries, peut assurer la consommation électrique des appareils électroniques et l'éclairage surtout si ce dernier est assuré par des diodes électroluminescentes.

Pour sa part, l'énergie solaire bénéficie actuellement de deux avancées significatives. Pour le solaire thermique, dont la technologie atteint un très bon rendement, la meilleure solution consiste à le coupler au chauffage au gaz avec condensation des fumées<sup>19</sup> le tout relié à un ballon d'eau de grand volume qui joue le rôle de réservoir calorique. L'économie dans nos latitudes est d'environ 10 %.

En revanche, c'est indéniablement le solaire photovoltaïque qui constituera l'avenir. En effet, même par temps couvert il produit de l'électricité. De plus, les tuiles solaires à base de silicium amorphe ou poly-cristallin sont en voie de généralisation avec un rendement actuel de 14 % pour tout type de toiture. La seule difficulté technique réside dans les parfaites connexions inter-tuiles qui doivent être protégées de toute oxydation ou infiltrations avec en plus un repérage pour identifier une éventuelle rupture de circuit. En Autriche, des refuges d'altitude particulièrement exposés aux intempéries fonctionnent depuis trois ou quatre ans avec une excellente fiabilité. Dans ce type d'exemple, qui pourrait être également celui d'une ferme isolée, il n'est pas nécessaire d'être relié au réseau EDF, un stockage par batteries suffit. Ces dernières permettent de fournir pendant la nuit l'électricité qu'elles ont stockée en journée.

Mais, en ville, la connexion au réseau est indispensable et doit comporter un maximum de souplesse. Ceci suppose que le distributeur d'énergie, par exemple l'UEM, sache gérer les fortes variations de production de l'ensemble des toitures reliées (et/ou des éoliennes) entre le jour et la nuit avec ou sans vent. C'est techniquement possible mais pas encore vraiment opérationnel. Toutefois, et c'est intéressant de le souligner, l'UEM, toujours elle, teste en ce moment dans l'île de la Réunion une nouvelle gestion des réseaux en fonction justement des aléas climatiques. En effet, le ciel s'y assombrit soudainement entraînant des chutes brutales de la production d'électricité solaire avec le risque de déséquilibre entre production et consommation.

Enfin d'intenses recherches sont menées actuellement à travers le monde pour améliorer les rendements notamment en créant des surfaces photovoltaïques de plus en plus fines avec des multicouches de silicium monocristallin

---

19. Les conduits de cheminées comportent deux tuyaux concentriques, l'un pour l'évacuation des fumées, l'autre pour amener l'air froid vers la chambre de combustion optimisée, ce qui permet de condenser l'eau des fumées.

de grande pureté dopées avec éléments donneurs ou accepteurs<sup>20</sup>. En améliorant les techniques de dopage, des rendements proches de 17 % ont été atteints. D'autres techniques consistant à joindre une couche de silicium amorphe à une autre constituée de silicium monocristallin permettent d'augmenter entre elles la différence de potentiel et d'obtenir des rendements plus élevés, de l'ordre de 22 à 23 %. D'autres laboratoires en Californie misent sur des cellules nano-structurées<sup>21</sup> qui devraient conduire à des rendements encore supérieurs. À partir de là, il n'est pas déraisonnable de penser que les immenses surfaces vitrées deviendront actives, c'est-à-dire productrices d'électricité.

En un mot, la révolution solaire se dessine. Elle bouleversera la conception architecturale. Il faut simplement espérer que l'exigence combinant esprit pratique et beauté puisse perdurer. Le développement durable ne doit pas être synonyme d'une architecture uniforme et sans âme ! Tout récemment, *Le Point* vient de publier un article sur ce sujet avec en image de synthèse un projet d'immeuble avec jardin intérieur et toiture photovoltaïque. L'ensemble ne manque pas d'allure<sup>22</sup>. La beauté architecturale est encore possible.

Reste l'épineux problème de la circulation des biens et des personnes. C'est celui qui engendre le plus de nuisance. Fin 2010, le parc automobile mondial sera proche de 900 millions de véhicules, automobiles et véhicules utilitaires confondus, sachant qu'actuellement la Chine et l'Inde sont en pleine expansion et rêvent de rattraper l'Occident. L'intense circulation génère beaucoup de maux : émission de CO<sub>2</sub>, émission de particules à la fois par combustion et usure des pneus, nuisances sonores auxquelles s'ajoutent le stress, les insuffisances respiratoires, les encombrements répétés, les accidents et des coûts globaux parfois exorbitants. Certes, les constructeurs rivalisent d'ingéniosité pour diminuer les consommations en dérivés pétroliers et les émissions de particules à l'aide de filtres catalytiques. Mais les transhumances de nos concitoyens lors des périodes de congés sont maintenant rythmées comme les couleurs des voyelles :

*Noir, corset d'autos sous un soleil éclatant,  
Rouge, gaz crachés dans les ralentissements,  
Orange, pâles ivresses, paix des rides  
Vert, divins vrombissements et flashes stupides!*

---

20. Dopage du silicium par des atomes de bore pour la partie accepteur d'électrons (couche p comme positif) et dopage par des atomes de phosphore (couche n comme négative) pour la partie donneuse d'électrons. La jonction entre les deux couches crée un champ électrique qui impose à la couche n de se déplacer vers la couche p.

21. C'est-à-dire de structures à l'échelle du milliardième de mètre.

22. « La révolution des immeubles à énergie positive » par Bruno Monier-Vinard, *Le Point*, n° 1956, 11 mars 2010, p 106.

Qu'il est loin le temps de la nationale 7 et du doux pays de notre enfance, synonyme de vacances et de liberté. Ne pourrait-on pas retrouver un peu de silence et des rythmes un peu moins effrénés ?

Mais ce n'est pas l'autoroute que nous pourrions très vite transformer, car elle draine bien trop d'enjeux économiques. En revanche, il est raisonnablement possible d'apporter des améliorations notables au cœur de la ville. En effet, il est rare d'y circuler plus de 80 km par jour et la vitesse moyenne excède rarement 30 km/h. De ce fait, les véhicules électriques de tous types sont parfaitement adaptés. Quel bonheur de pouvoir conduire une voiture silencieuse, non polluante, dotée d'un couple important et d'une autonomie de plus de 120 km par charge. Le soir venu, un simple branchement sur une prise électrique standard et la batterie se recharge pendant la nuit pour un coût de 2 à 3 euros. Toutefois, la location des batteries et leur remplacement périodique pour recyclage compenseront l'économie réalisée. Dans une telle hypothèse, les immeubles et maisons devront intégrer de vastes parkings afin que les familles puissent y placer leurs véhicules électriques et les charger.

L'avènement de l'auto électrique sera par conséquent la vraie révolution des villes. Ainsi par exemple, les immenses parkings des centres commerciaux, surchauffés en été, balayés par les vents en hiver, pourront être dotés de panneaux servant à la fois d'auvents protecteurs et de sources énergétiques. Une telle expérience a été tentée à Montpellier par une grande surface lui assurant ainsi une économie d'énergie substantielle avec en plus l'adhésion de la clientèle. Dans l'avenir, ces mêmes parkings offriront la possibilité de recharger partiellement les véhicules électriques pendant les courses familiales.

Enfin, et ce n'est plus à démontrer, les transports en commun doivent être résolument électriques. Le meilleur exemple est celui de la ville de Bordeaux. Actuellement, trois lignes de tramways quadrillent la ville et son centre historique, tandis qu'une quatrième, voire une cinquième sont à l'étude. Le résultat est déjà impressionnant : la circulation automobile est plus fluide et l'hypercentre en est débarrassé. Le concept technique choisi, avec en plus des deux rails traditionnels un rail central qui n'amène le courant électrique qu'à l'endroit où il circule, a permis de s'affranchir des caténaires tout en garantissant une sécurité absolue pour les piétons. Certes le coût est élevé, mais la ville garde son charme et son calme avec des commerces qui s'en portent bien. Les banlieues lointaines ainsi que le principal campus universitaire ont été progressivement raccordés tandis que d'autres suivront. C'est un exemple à suivre et à perfectionner.

Plus récemment, la Corée du Sud vient de mettre au point un petit train<sup>23</sup> qui fonctionne par induction grâce à une bande électrique de 400 mètres

---

23. Le prototype s'appelle OLEV (On Line Electric Vehicle) mis au point par le « Korea Advanced Institute of Science and Technology ».

de long située 5 cm sous le revêtement produisant le champ magnétique nécessaire. Le train (ou une petite voiture conçue à cet effet) peut ensuite rouler sur 400 mètres supplémentaires grâce aux batteries qui se sont chargées sur les parties inductives. Le maire de Séoul envisage de remplacer une bonne partie des transports en commun par ce nouveau type de véhicule électrique. L'objectif est bien d'améliorer la qualité de l'air et de diminuer la pollution de la capitale coréenne.

## En conclusion

« *Noir c'est noir* », chantait Johnny Halliday en 1965<sup>24</sup>. À trop noircir et polémiquer, le fil du bon sens et de l'optimisme se perd. Trop de nostalgie émeut, mais démobilise.

L'évolution est rapide, ce qui est vrai aujourd'hui ne le sera plus tout à fait demain. Le bilan sommaire sur l'état de la planète n'est qu'une photographie du temps présent. Certains chiffres vont évoluer au fil des découvertes et des changements sociétaux comme les effets de modes.

Au-delà de la polémique sur le réchauffement, l'alerte donnée à la fois par le monde scientifique, politique et médiatique sur l'état et l'avenir de notre belle planète bleue a donné de fortes impulsions qui ne peuvent qu'être bénéfiques à moyen terme. Que l'on en juge.

La première conscience émotionnelle de notre solitude dans l'espace date du voyage Apollo XI sur la lune avec ces merveilleuses photographies des levers de Terre sur le fond noir du vide sidéral.

Le club de Rome dans son fameux rapport de 1972 intitulé « *Les limites de la croissance* »<sup>25</sup> donna l'essor à la conscience écologique mondiale alors que nous étions à l'apogée des Trente Glorieuses au cours desquelles la croissance semblait sans limite. Plus tard, les protocoles de Kyoto, de Rio et autre Copenhague en liaison avec d'autres organismes comme le fameux GIEC dont on parle tant, ont sonné l'alerte avec, comme toujours, des aspects pour le moins contrastés mais dont on ne peut nier les effets positifs.

La limitation mondiale en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> a incité tous les constructeurs automobiles à réduire les consommations et surtout à limiter les émissions d'imbrûlés et de particules ainsi que celles d'autres gaz corrosifs et toxiques comme le monoxyde de carbone, l'ozone, les oxydes de soufre et d'azote. Mais dans le même temps, le nombre des véhicules en circulation

---

24. « *Noir c'est noir* », paroles de Georges Aber, musique de Steve Wadey, Tony Hayes et M. Grainger, 1965.

25. « *The Limits to Growth* », Club de Rome, 1972.

augmente et ne cesse de croître, notamment en Chine et en Inde. De plus, même si les moteurs thermiques limitent leurs émissions de particules, celles qui ne sont pas filtrées sont très fines et d'autant plus dangereuses car elles peuvent pénétrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires. En poursuivant nos efforts dans tous les domaines des sciences et des humanités, peut-être trouverons-nous la clé du réchauffement climatique et le contrôle de l'air que nos petits-enfants respireront. C'est à espérer !

Dans le même temps, la conscience de prendre à bras le corps la maîtrise de l'eau douce à tous les niveaux de responsabilité a freiné considérablement la pollution des cours d'eau, au moins en Europe. Rien n'est gagné, la vigilance est de rigueur. L'eau appartient à tous, elle a besoin de soins attentifs et d'une volonté politique sans faille, surtout dans tous les pays où le seuil critique d'approvisionnement est atteint (inférieur à 100 m<sup>3</sup>/an/ha) depuis longtemps. La gestion de l'eau en notre monde reste le problème majeur de l'humanité. Les efforts menés pour réduire les effets du réchauffement de l'atmosphère, et par conséquent la diminution de la ressource en eau, se justifient à eux seuls même si les mécanismes en sont incomplètement compris.

Les réserves en combustibles et en métaux se réduisent comme peau de chagrin à tel point que nombre de procédés catalytiques ou de composés électroniques à haute valeur ajoutée ne pourront plus être produits dans l'avenir. Ce signal d'alerte aux industriels de hautes technologies a eu son effet : enfin l'industrie du recyclage, considérée il n'y a pas si longtemps comme un gadget d'écologistes attardés, prend ses lettres de noblesse avec de très nombreux brevets et procédés. Nous ne sommes qu'aux prémices de ce type d'industries. En fait, tout procédé devra, dès le départ, intégrer le recyclage de la matière première. Le meilleur exemple actuel est celui des batteries au lithium des véhicules électriques car le plus grand gisement accessible est un lac salé solide en Bolivie, lequel sera vite épuisé si ce type de véhicule se généralise comme prévu.

Cet autre monde commence à voir le jour avec cette double exigence de préserver la nature et le cadre de vie tout en améliorant les économies de nos villes et de nos campagnes. Un champ immense d'innovations et d'améliorations techniques s'ouvre pour les jeunes générations pour que notre espace vital puisse encore inspirer les poètes. En cela, la merveilleuse chanson de Jean Ferrat prend tout son sens : « *Pourtant que la montagne est belle, comment peut-on s'imaginer en voyant un vol d'hirondelle, que l'automne vient d'arriver...* » Je laisse la parole aux poètes<sup>26,27,28</sup> ils avaient tout compris depuis longtemps !

---

26. FERRAT (Jean), « La Montagne » (1964), SAKA (Pierre), *La grande Anthologie de la chanson française*. Le Livre de Poche, Librairie Générale Française, 2001.

27. ARAGON (Louis), *Œuvres poétiques complètes*, La Pléiade.

28. VALÉRY (Paul), *Palme*, Charmes, Gallimard Ed.

### Note n° 1

La réaction de fission de l'isotope fissible de l'uranium, l'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ) par capture d'un neutron rapide conduit à du baryum 139 et du krypton 94 avec émission de 3 autres neutrons rapides. Le défaut de masse de cette réaction de fission délivre  $82 \cdot 10^9$  joules pour 1 gramme d'uranium 235, soit 22780 kWh/an ! 1 tonne d'uranium enrichi à 3,7 % donnera avec un rendement électrique de 35 % environ 295 millions de kWh/an.

### Note n° 2

La réaction de fusion entre le deutérium (isotope de l'hydrogène de masse atomique 2) et le tritium (isotope de l'hydrogène de masse atomique 3) conduit à un atome d'hélium et un neutron. Le tritium est produit à partir du lithium 6 ou du lithium 7. Le deutérium est abondant (1 atome de D pour 6700 atomes d'hydrogène H). le défaut de masse de la réaction de fusion délivre une énergie de  $339 \cdot 10^9$  joules par gramme. Mais pour que cette formidable énergie puisse être produite, il faut atteindre une température comprise entre 47 et 80 millions de degrés. Pour que la réaction se maintienne dans le temps, il est nécessaire de stabiliser la température du plasma autour de 24,5 millions de degrés. À de si hautes températures, la matière est appelée plasma. Les atomes sont ionisés (perte d'électrons) et peuvent être contenus par un champ magnétique intense en forme d'anneau. On parle d'anneau toroïdal d'aimants supraconducteurs. De telles températures peuvent être atteintes à l'aide de laser de très grande puissance et focalisé sur la matière en un temps très court.

La réaction de fusion à partir d'une tonne d'hydrogène à 0,0148 % de deutérium conduit théoriquement par fusion avec le tritium à 14 millions de kWh. Sachant que le rendement serait de l'ordre de 80 %, l'énergie récupérable serait de l'ordre de 11,2 million de kWh/tonne. Par contre, le rendement électrique réel en conditions opérationnelles ne peut être évalué pour l'instant.

### Note n° 3

Le thorium 232 est un métal blanc argenté, faiblement radioactif (sa demi-vie est environ trois fois celle de la terre soit 14 milliards d'années. Il est relativement abondant dans la thorite (silicate de thorium) ou dans la monazite qui est un phosphate mixte de thorium et de terres rares (12 % de Th). Bien qu'il ne soit pas fissible lui-même, le thorium 232 est un isotope fertile comme l'uranium 238. En réacteur nucléaire, il absorbe un neutron thermique pour donner le thorium 233 lequel émet un électron et antineutrino (radioactivité  $\beta^-$ ) pour se transformer en protactinium 233. Ce dernier émet encore un électron et un antineutrino (électronégativité  $\beta^-$ ) pour se transformer en uranium 233 qui est le véritable combustible nucléaire. En effet, l'uranium 233 a de meilleures propriétés que les deux autres isotopes fissibles de l'industrie nucléaire que

## *L'impact de l'énergie sur la société future*

sont l'uranium 235 et le plutonium 239 car il donne plus de neutrons par neutron absorbé. À l'heure actuelle, deux procédés utilisant le thorium sont à l'étude : le premier est un réacteur à sel fondu dans lequel le thorium, l'uranium et le plutonium sont sous forme de tétrafluorures, testé à Oak Ridge dans le Tennessee. Le deuxième est un réacteur dit à « propagation d'onde » avec un cœur constitué d'oxydes de thorium/uranium 233 et de Th/plutonium 239 entourés d'oxydes Th/Uranium 233 arrangés sous forme de couches concentriques. Il est conçu pour pouvoir fonctionner pendant 100 ans sans recharge. C'est le récent projet de Bill Gates avec la société Hitachi. Ce projet intéresse beaucoup l'Inde car ce pays a d'importantes réserves de thorium. ■