

RELEVER LE DEFI DE L'ENERGIE : UNE IMPERIEUSE NECESSITE

par
Ivan GILLET¹,

Docteur en science physico-chimique

PLAN :

- I. L'impasse.
- II. Voir loin... dès maintenant.
- III. Géographie, biomasse et vecteurs d'énergie.
- IV. Rôle central de la conversion électrochimique.
- V. Bifurquer : Relever le défi.
- VI. Conclusion : Nous sommes tous concernés.

I. L'IMPASSE

Sous le titre "L'impasse industrielle", Ingmar Granstedt² a publié un livre dans lequel il décrit la situation technico-organisationnelle de notre civilisation occidentale telle qu'il la voyait à la fin des années 1970.

Vingt-cinq ans plus tard, je pense que l'on peut préciser cette vision en distinguant trois aspects de cette impasse dans laquelle notre civilisation s'est engagée depuis le début de ce qu'on a appelé "la révolution industrielle" ou "l'ère industrielle" au tournant du 18^e au 19^e siècle.

Cette impasse a un **aspect énergétique**, que je vais surtout développer ici, et aussi un aspect environnemental et un aspect social.

Il est urgent maintenant de trouver comment sortir de cette impasse, car le fond est en vue !

En effet, à l'échelle mondiale, qui sera notre cadre dans cet article, et en ce début de 21^e siècle, la majeure partie de notre énergie (81 à 86% selon les auteurs) provient de sources épuisables : pétrole, gaz naturel, charbon et uranium pour les centrales nucléaires. Le reste (14 à 19%) vient de sources renouvelables : biomasse, hydraulique, etc ...

L'impasse énergétique se présente sous forme d'une série de **problèmes** dont certains proviennent des **sources d'énergie**, tandis que d'autres sont relatifs aux **filières énergétiques**, c'est à dire aux séries de transformations de formes d'énergie depuis les sources jusqu'aux utilisations finales.

La distinction entre sources et filières est essentielle pour voir clair dans les problèmes et les voies de leurs solutions.

I.A. PROBLEMES LIES AUX SOURCES D'ENERGIE

I.A.1 – L'épuisement

Le pétrole, le gaz naturel et l'uranium pour les centrales nucléaires seront épuisés dans le courant du 21^e siècle. Le charbon disparaîtra un peu plus tard et il est bien connu qu'il faudra trouver d'autres sources.

I.A.2 – L'équilibre thermique de la Terre

L'effet de serre est dû à l'absorption partielle, par l'atmosphère, du rayonnement thermique (I-R = Infrarouge) de la Terre vers l'espace. Le nom de cet effet a été donné par analogie avec ce qui se passe dans une serre agricole où le vitrage est transparent aux rayons reçus du

¹ tél : +32 (0) 4 365 47 75

² Ed.Seuil.1980

Soleil, mais partiellement opaque au rayonnement thermique (infrarouge de grande longueur d'onde) réémis par le sol de la serre, d'où l'élévation de sa température.

Dans l'atmosphère, seuls certains gaz sont absorbants pour le rayonnement thermique. Ils sont appelés « gaz à effet de serre ».

Le principal d'entre eux est le gaz carbonique (CO₂). Il contribue pour au moins 50% à l'effet de serre.

Cet effet de serre n'est pas nouveau dans notre atmosphère. C'est grâce à lui que la vie a pu naître sur notre planète et que nous existons.

En effet, la vie est née dans l'eau liquide et, sans effet de serre, la Terre n'aurait connu que la glace, car sa température moyenne annuelle mondiale serait de -18°C au lieu de +15°C environ actuellement.

Ce qu'on appelle le « **problème de l'effet de serre** », qui modifie l'équilibre thermique de la Terre et perturbe les climats, ce n'est pas celui de l'effet de serre lui-même, mais de son augmentation rapide due en très grande partie à la production massive de dioxyde de carbone (CO₂) par la combustion des combustibles fossiles.

Ces derniers se sont formés en plusieurs millions de siècles et nous les aurons épuisés en quelques siècles ! Le rapport est de un pour un million !

I.B. PROBLEMES LIES AUX FILIERES ENERGETIQUES

Les filières énergétiques relient les sources aux formes finales d'énergie utile. Nous l'avons déjà dit : trois sources principales d'énergie sont utilisées actuellement : l'énergie chimique [chim.] des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire [Nucl.] de l'uranium et l'énergie gravitationnelle [Grav.] de l'eau en altitude.

De ces trois sources – [Chim.], [Nucl.], [Grav.] –, partent différentes filières énergétiques pour aboutir aux trois principales formes finales d'énergie utile : l'énergie thermique (Therm., chaleur), l'énergie mécanique (Méca., travail, mouvement), l'énergie électrique (Elec.) et tout ce qui en dérive (Fig. 1). [Voir annexe à la fin de l'article pour les figures 1 à 4].

Parmi ces filières, il en est quatre qui se recouvrent partiellement et assurent conjointement près de 90% de nos besoins. Trois de ces filières partent de l'**énergie chimique** [Chim.] des combustibles fossiles et quelques % de la biomasse.

- La première donne de la chaleur (**énergie thermique**, Therm.) par **combustion thermique** : [Chim.] → (Therm.) (Fig.1).
- Le deuxième donne de l'**énergie mécanique** (Meca., travail, mouvement, **énergie dynamique**) par la combinaison d'une combustion thermique et d'une « **conversion de CARNOT** »³ appelée aussi conversion « **thermodynamique** » parce qu'elle transforme de l'énergie **thermique** (Therm.) en énergie **dynamique** (Méca.) (Fig. 1). Cette deuxième filière peut se résumer comme suit : [Chim.] → (Therm.) → (Méca.).

C'est la filière des **moteurs thermiques** (machines à vapeur, moteurs à explosions, moteurs à réaction).

- La troisième filière est celle des **centrales électriques** à combustibles fossiles où l'énergie mécanique d'un moteur thermique entraîne une génératrice pour fournir de l'énergie électrique.

En résumé : [Chim.] → (Therm.) → (Méca) → (Elec.) (Fig.1)

³ Cette conversion a été étudiée par CARNOT en 1824.

Une quatrième filière est celle des **centrales nucléaires** : la chaleur y est produite à partir d'énergie nucléaire [Nucl.] au lieu d'énergie chimique. La suite de la filière reste inchangée pour produire de l'énergie électrique.

En résumé : [Nucl.] → (Therm.) → (Méca) → (Elec.) (Fig.1)

L'ensemble de ces quatre filières se recouvrant partiellement forment ce qu'on appelle la « **filière thermodynamique** » par extension du nom de la « conversion de CARNOT ». (Fig. 1)

Cette « **filière thermodynamique** » est malheureusement intrinsèquement **polluante** et **gaspilleuse** d'énergie comme nous allons le voir sur ses différentes sections.

Les nuisances de la filière thermodynamique

Dans la **combustion thermique** [Chim.] → (Therm.) (Fig. 1) qui sert tous les usages de la chaleur, le comburant n'est pas l'oxygène pur, mais l'oxygène de l'air, c'est-à-dire un mélange d'oxygène et d'azote.

Aux températures élevées de cette combustion, l'oxygène réagit non seulement avec le combustible carboné, mais aussi avec l'azote, ce qui donne des oxydes d'azote gazeux. Dans l'atmosphère, l'humidité les transforme en acide nitrique (source de pluies acides, pollution majeure des forêts et autres lieux). Par un processus analogue, le soufre de certains combustibles fossiles donne de l'acide sulfurique (autre source de pluies acides !).

Très souvent, la combustion thermique est incomplète, spécialement dans les moteurs à explosions. Cela envoie d'autres polluants dans l'atmosphère : notamment du monoxyde de carbone (CO), poison mortel, et des hydrocarbures incomplètement brûlés, sources d'autres nuisances.

En effet, dans le trafic automobile dense des villes par fort ensoleillement, ces hydrocarbures, émis par tous les échappements de voitures, sont impliqués dans des réactions photochimiques complexes avec l'oxygène de l'air, ce qui donne de l'ozone (O₃), puissant oxydant nuisible à la santé (yeux, voies respiratoires).

Cet ozone « troposphérique » (de basse atmosphère) ne doit pas être confondu avec l'ozone « stratosphérique » (la même molécule O₃ en haute atmosphère). Ce dernier est bénéfique, car il nous protège des rayons ultraviolets trop « durs » du Soleil.

Dans la deuxième section de la filière d'ensemble (Fig. 1), la « **conversion thermodynamique** » (Therm) → (Méca.), présente un autre inconvénient majeur : le « **principe de CARNOT** » précise que le rendement de cette conversion est limité par un maximum théorique indépassable.

Ce maximum dépend de l'écart entre les deux températures du système : la haute et la basse. Et cet écart est borné par les conditions physiques de la machine : vers le haut par la température maximum que peuvent supporter les matériaux de cette machine et vers le bas par la température ambiante. Il s'agit là de l'inéluctable « **limite de CARNOT** ». Combinée avec les pertes pratiques de toute transformation concrète, cela constitue, sous forme de chaleur dissipée dans le milieu, un gaspillage d'énergie considérable et à grande échelle.

Ainsi, l'électricité que nous recevons d'une centrale ne représente qu'un tiers environ de l'énergie chimique du combustible entré dans la centrale. Le reste est gaspillé en chaleur perdue pour notre usage⁴.

Un autre exemple est celui des véhicules routiers qui gaspillent en chaleur perdue au moins 80% de l'énergie chimique du carburant. Et comme l'énergie gaspillée pollue de la même manière que l'énergie utile, puisqu'elles passent toutes les deux par la combustion thermique, cela augmente énormément la pollution : pour chaque unité d'énergie utile, on a 3 à 5 unités de pollution au lieu d'une ! Quant à la technique des centrales nucléaires, elle a, outre la « limite de CARNOT », des problèmes spécifiques qui sont aussi redoutables.

⁴ Sauf en cas de « cogénération » où une partie de cette chaleur est récupérée pour une utilisation thermique. Mais la technique de « cogénération » n'est encore que très peu répandue.

Si l'on ajoute à tout cela la pollution thermique des fleuves et de l'atmosphère au voisinage des centrales électriques, la pollution acoustique par les moteurs à explosions et les réacteurs d'avions, la pollution électromagnétique et visuelle par les lignes à haute tension, on voit que notre système énergétique est l'une des principales sources de nuisances et de problèmes pour nous et notre environnement.

II. VOIR LOIN⁵

II. A. PREAMBULE

II. A. 1. Sortir du cadre

Ayant constaté que notre système énergétique actuel n'est ni propre, ni durable, on ne peut que souhaiter en changer le plus tôt possible. Mais, comment faire ?

A mon avis, il faut **oser sortir** délibérément **du cadre** de ce qui a été fait jusqu'à présent et établir un plan d'ensemble basé sur **une vision globale à très longue échéance**. Il s'agit de voir loin et en profondeur pour se fixer un but bien défini et ensuite d'étudier les étapes nécessaires pour atteindre ce but.

Nous examinerons successivement les sources et les filières énergétiques puisqu'elles ont chacune leurs problèmes spécifiques

II. A. 2. Peu de chiffres dans ce texte

Pourquoi ? Parce que :

1°) Les chiffres évolueront au fur et à mesure de l'avancement du développement des nouvelles sources d'énergie.

2°) L'étude quantitative approfondie des différentes filières énergétiques futures et l'élaboration de "scénarios" est une affaire d'équipes interdisciplinaires. Je me centre donc sur les principes et leurs possibilités.

3°) L'espèce humaine n'est qu'une partie de la "biosphère", et les autres espèces vivantes ont également besoin d'énergie. Que deviendra le partage ?

4°) Nous ne savons pas comment se transformera la consommation énergétique de l'humanité. Poursuivra-t-elle dans la voie occidentale suicidaire du "toujours plus" et du gaspillage ? Ou bien un effort éducatif et culturel gigantesque et permanent, visant la sobriété, arrivera-t-il à ramener cette consommation à un niveau raisonnable et soutenable pour tous ? Il y a là un choix qui dépend de nous tous, les citoyens du monde !

II. B. CHANGER DE SOURCES

II. B. 1. Les sources à éliminer

Une première remarque est nécessaire ici concernant la hiérarchie des **combustibles fossiles** dans leurs contributions à l'augmentation de l'effet de serre : c'est le **charbon** qui pose le problème le plus grave, car c'est lui qui produit le plus de gaz carbonique (CO₂) par unité d'énergie fournie lors de la combustion. C'est le **gaz naturel** qui produit le moins de CO₂ par unité d'énergie et le **pétrole** est entre les deux.

Etant donné le caractère inéluctable de l'épuisement des combustibles fossiles et de l'uranium, il se pourrait que l'on attende cet épuisement pour les remplacer par d'autres sources !

Mais, vu la gravité des problèmes que leur emploi pose dès maintenant, je crois qu'il serait souhaitable d'en abandonner l'usage le plus tôt possible.

⁵ Voir, notamment, Hubert Reeves avec Frédéric Lenoir : "MAL DE TERRE", Ed.Seuil, mars 2003.

Ce qui resterait de combustibles fossiles pourrait alors être utilisé comme « **minerais de carbone** » pour produire des matières premières destinées, par exemple, à la fabrication de polymères (plastomères, élastomères et fibres synthétiques) comme le fait déjà la « **pétrochimie** ». Les objets ainsi fabriqués devraient être recyclés et non brûlés.

Quant à l'uranium pour les centrales nucléaires, son abandon précoce permettrait de limiter l'accumulation des **déchets nucléaires** que nos descendants devront surveiller pendant des millénaires.

En ce qui concerne la « **fusion nucléaire contrôlée** », étant donné les dangers de l'hypercentralisation et de ses conséquences que cette technique pourrait induire si on arrive un jour à la maîtriser, je pense qu'il serait judicieux d'arrêter les dépenses considérables que l'on y consacre et de reconvertir cet argent vers le développement des énergies renouvelables.

II. B. 2. Les sources d'énergie renouvelables

Il y a trois sources d'énergie renouvelable de natures très différentes et d'importances quantitatives extrêmement inégales : le **Soleil** et tout ce qui en dérive, la **géothermie naturelle** et les **marées**.

La **géothermie naturelle**, c'est la chaleur de la Terre qui vient spontanément à la surface du sol, par exemple sous forme d'eau chaude dans les geysers comme en Islande. Elle ne doit pas être confondue avec la géothermie forcée, appelée aussi géothermie profonde.

Celle-ci est exploitée en injectant de l'eau froide dans le sous-sol par un forage à grande profondeur, et en retirant, à quelque distance de là, de l'eau chaude par un autre forage. De ce fait, on refroidit le sous-sol et l'exploitation ne peut durer qu'un certain temps. Ce n'est donc pas une source d'énergie renouvelable. Il en est de même de certaines nappes souterraines d'eau chaude à température modérée comme dans la région parisienne.

Quantitativement et géographiquement, la **géothermie naturelle** et les **marées** ne peuvent être que des **sources d'appoint local**, car elles ne sont exploitables qu'en quelques points du monde, et en quantité globale très inférieure à la consommation mondiale actuelle d'énergie de l'humanité.

La seule source d'énergie renouvelable quantitativement suffisante à l'échelle mondiale pour nos petits-enfants, ce sera le **Soleil**.

En effet, en tenant compte de la dispersion des chiffres selon les auteurs, la quantité d'énergie que notre planète reçoit du Soleil en un an au niveau du sol et des océans se situe entre 7.000 et 10.000 fois la consommation énergétique annuelle de toute l'humanité actuellement. On ne peut pas dire, à priori, que c'est insuffisant.

Les **sources d'énergie** venant du **Soleil** sont de quatre formes différentes.

La première et la plus évidente, c'est le **rayonnement, direct** (quand le Soleil est visible) et **diffus** (à travers les nuages) qui donne **lumière et chaleur**.

Trois autres sources importantes d'énergie sont dérivées du Soleil :

- **la biomasse végétale** que produit la photosynthèse chlorophyllienne ;
- **l'énergie hydraulique** (chutes et cours d'eau) résultant du cycle de l'eau provoqué par la chaleur solaire ;
- **le vent** (énergie éolienne) produit par la distribution différenciée de la chaleur solaire à la surface de la Terre.

II. C. CHANGER DE FILIERES

Faisons une place à part pour la filière alimentaire. Elle ne changera pas fondamentalement car c'est déjà une filière solaire passant par la photosynthèse chlorophyllienne et tout ce qui suit. Ce qui changera dans cette filière, c'est l'énergie pour les outils de l'agriculture : tracteurs, machines, transports, engrais, etc. Cela relève des filières qui vont suivre.

II. C. 1. Deux filières solaires de transition

Ici, le changement de filière résulte simplement d'un changement de source : on supprime l'usage des combustibles fossiles et on remplace la source nucléaire terrestre actuelle par la fusion nucléaire qui se passe au centre du Soleil.

A partir du rayonnement solaire, la photosynthèse chlorophyllienne donne de la matière végétale dont on peut tirer certains combustibles. Il s'agit de ce qu'on appelle les **biocombustibles** et les **biocarburants**.

Les **biocombustibles**, destinés à la production de chaleur, peuvent être solides (bois, charbon de bois, déchets agricoles, etc.), ou liquides (différents alcools, par exemple) ou gazeux (biométhane, gaz de gazogène).

Les **biocarburants** sont aussi des combustibles, mais ils doivent avoir des caractéristiques spéciales convenant pour le fonctionnement en moteurs à explosions. Ceux dont on parle le plus sont, d'une part l'éthanol à partir de canne à sucre ou de betterave et, d'autre part le « diester », carburant pour moteur diesel à partir de l'huile de colza.

La filière des **bio-combustibles** peut se résumer comme suit (Fig. 2) :

Lumière solaire (Phot.) → Matière végétale [Chim.] → Bio-combustible [Chim.]
→ Chaleur (Therm.)

Pour les **biocarburants** cette filière se prolonge jusqu'à l'énergie mécanique de mouvement des véhicules (Fig. 2) :

(Phot.) → [Chim. végét.] → [Chim. comb.] → (Therm.) → (Méca.)

Dans les deux cas, on ne change que le début de la filière classique du présent. On supprime ainsi le problème de l'augmentation de l'effet de serre puisque le gaz carbonique (CO₂) produit par la combustion est recyclé par la photosynthèse végétale. Mais on conserve les inévitables pollutions de la combustion thermique : [Chim.] → (Therm.) et la « perte de CARNOT » : (Therm.) → (meca), (Fig. 2.). C'est pourquoi ces deux filières ne devraient être qu'une transition vers d'autres filières intégralement propres.

II. C. 2. Deux autres filières thermodynamiques

Depuis quelques décennies ont été expérimentées des **centrales solaires thermodynamiques** (fig. 3).

Celles-ci fonctionnent selon le même principe que les centrales électriques classiques. De la chaleur est convertie en énergie mécanique, puis cette dernière en énergie électrique. Mais ici, la chaleur n'est plus produite par combustion thermique d'un combustible, mais à partir du rayonnement solaire concentré par miroirs afin d'atteindre les hautes températures nécessaires pour un rendement énergétique acceptable (Fig. 3.).

La concentration optique par miroir outre sa fragilité, requiert du rayonnement direct, c'est-à-dire sans nuage, pendant une durée suffisante chaque jour. Elle n'est donc possible que dans certaines régions du globe.

Dans cette filière, on conserve la conversion thermodynamique de CARNOT, avec son rendement limité par un plafond théorique indépassable (principe de CARNOT). Mais on a supprimé tous les problèmes d'environnement liés aux centrales classiques : augmentation de l'effet de serre et pollutions chimiques de la combustion thermique.

Une autre filière solaire thermodynamique est celle de ce qu'on appelle **l'énergie thermique des mers**. Dans les mers tropicales, l'eau de surface, chauffée par le Soleil, peut atteindre des températures supérieures de 20°C à celle de l'eau des profondeurs. Cette différence de température pourrait, en principe, faire fonctionner un cycle thermodynamique, comme dans le cas précédent (Fig. 3).

L'idée remonte à plus d'un siècle. Cependant, vu la faiblesse de l'écart de température et donc de rendement possible, et les difficultés techniques considérables, aucune réalisation pratique

n'a encore vu le jour. Mais, la réserve d'énergie qui se trouve là est tellement énorme que l'idée n'est pas abandonnée.

II. C. 3. Cinq filières solaires d'avenir

La première de ces cinq filières solaires d'avenir est celle des **capteurs thermiques plans pour le chauffage** de l'eau sanitaire et des habitations, avec ou sans pompe à chaleur. (Fig. 4, flèche 1). Le stockage d'énergie se fait généralement par l'eau chaude.

Les quatre autres filières donnent de l'**énergie électrique** (Fig. 4, flèches 2, 3, 4 et 5 + e).

Il s'agit de la **filière hydraulique** à partir de l'énergie gravitationnelle [Grav.] de l'eau en altitude (flèches 2), de l'**énergie éolienne** du vent (flèches 3), des **cellules photovoltaïques** transformant directement le rayonnement solaire en énergie électrique (flèche 4), et de la **filière bio-électrochimique** (flèches 5 + e).

Dans cette dernière, la photosynthèse chlorophyllienne donne de la matière végétale dont on tire l'un ou l'autre **Combustible Electrochimique Stockable et Transportable** (C.E.S.T.).

Ce combustible alimente ensuite une **pile à combustion électrochimique**⁶ (flèche e) pour donner directement de l'énergie électrique.

On connaît la souplesse et les multiples possibilités de l'énergie électrique : elle permet d'obtenir, aisément et avec de bons rendements, de l'énergie mécanique de mouvement pour les transports et les machines (Fig. 4, flèche m), de la chaleur (flèche t), de la lumière, ainsi que toutes les applications électroniques, etc...

III. GEOGRAPHIE, BIOMASSE ET VECTEURS D'ENERGIE.

Pour satisfaire les besoins futurs de l'humanité avec les énergies dérivées du Soleil, le problème n'est pas celui de la quantité globale mondiale, il se situe ailleurs : il est d'une part dans la **diversité de nature des différentes sources dérivées du Soleil**, et d'autre part dans leur **distribution géographique** qui correspond très mal à la répartition des besoins énergétiques de l'humanité. Les variations diurnes et saisonnières de ces sources compliquent encore la question.

Il y a là un problème gigantesque. Mais il est soluble avec les techniques connues si on y met le temps et la volonté politique poussée par la volonté des citoyens, éclairés par les scientifiques, notamment les enseignants en sciences.

En fait, il y a, dans le monde, des régions de caractéristiques très différentes quant à leurs **ressources** énergétiques renouvelables et à leurs **besoins** énergétiques : certaines ont des ressources plus abondantes que leurs besoins, tandis que d'autres ont des besoins plus grands que leurs ressources.

Un exemple caractéristique dans ce domaine est celui de la Belgique : elle a une des plus fortes densités de population du monde et trop peu de ressources énergétiques renouvelables.

De ce fait, et d'après les données disponibles, elle importe actuellement environ 98% de l'énergie qu'elle consomme. En développant son potentiel d'énergies renouvelables, elle pourrait réduire ses importations d'énergie à quelque 92% de sa consommation actuelle ! Les économies d'énergie pourraient améliorer la situation, mais ce pays ne pourra jamais être énergétiquement autonome avec sa population et son niveau de vie actuels.

Pour importer de l'énergie, parfois de loin, il faut un ou des **"vecteurs d'énergie"** qui soient, à la fois, stockables longtemps et transportables sur de grandes distances.

⁶ Cette pile, qui sera décrite au chapitre IV, est souvent désignée par l'expression incomplète « pile à combustible », traduction incorrecte de l'anglais « fuel cell », où « fuel » signifie à la fois, combustible et comburant, les deux réactifs indispensables du processus de combustion.

Le succès des combustibles fossiles est dû, en grande partie, au fait qu'ils sont, en même temps, sources et vecteurs d'énergie, stockables et transportables. Mais, en plus de leur impact environnemental néfaste, ils seront bientôt épuisés !

Par contre, avec la **biomasse**, la nature nous montre la voie.

La question peut alors s'énoncer ainsi : Quels sont, parmi les **vecteurs d'énergie**, stockables, transportables, que l'on peut produire à partir de sources d'énergie renouvelable, ceux qui sont utilisables dans les filières énergétiques propres ?

A partir de l'électricité des filières hydraulique, éolienne et photovoltaïque (fig.4, flèches 2, 3 et 4), c'est l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau (flèche s, fig. 4 et 3). On pourra ainsi se passer des lignes à haute tension qui sont coûteuses, gaspilleuses d'énergie et ne résolvent pas le problème du stockage.

Avec la **biomasse**, on peut aussi fabriquer de l'hydrogène, mais également toute une série de **combustibles** carbonés qui sont de bons vecteurs d'énergie et conviennent à la combustion thermique (feu ou explosion). Mais ils ne sont pas tous appropriés à la combustion électrochimique en pile que nous allons voir plus amplement au chapitre suivant.

La combustion thermique s'accommode de tous les combustibles, grâce à sa haute température, mais nous avons vu qu'elle est intrinsèquement polluante. Entre parenthèses :

On peut se demander pourquoi on parle seulement maintenant de cette pollution, alors que le feu est utilisé depuis 500.000 ans ! Deux hypothèses explicatives peuvent être avancées :

1°) A cause de l'accroissement récent et considérable de la population mondiale et de la puissance technique, donc de la consommation d'énergie, les conséquences néfastes de la combustion thermique sur la santé et l'environnement sont devenues perceptibles.

2°) Depuis un siècle ou deux, les moyens de détection et d'analyse des pollutions ont été fortement perfectionnés.

Maintenant que les nuisances de la combustion thermique sont devenues manifestes, il est grand temps de chercher à la remplacer le plus possible par autre chose. Et nous verrons que cela ne peut être que la "**combustion électrochimique**". Mais celle-ci est beaucoup plus sélective quant aux combustibles utilisables.

Jusqu'à présent, et provisoirement, il n'y a encore que l'hydrogène (un gaz) et le méthanol (un liquide) qui sont utilisables en pile à combustion électrochimique. Tous deux peuvent être fabriqués à partir de la **biomasse** végétale par des procédés connus. D'autres candidats sont possibles, toujours à partir de la biomasse, par exemple les polyols (glycol, glycérol, etc ...) et même le glucose, mais il faudrait pousser les recherches dans cette direction.

IV. LE RÔLE CENTRAL DE LA CONVERSION ÉLECTROCHIMIQUE D'ÉNERGIE

IV. A. DE L'ÉNERGIE CHIMIQUE A L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

IV. A.1. Convergence

Dans la figure 4, la flèche « e » représente la production directe d'énergie électrique à partir d'énergie chimique par conversion électrochimique dans une pile ou un accumulateur en décharge. La flèche « s » représente le stockage, c'est-à-dire la conversion directe d'énergie électrique en énergie chimique par électrolyse ou charge d'un accumulateur.

Si ces deux conversions électrochimiques sont au centre de la figure 4, ce n'est pas simplement pour la géométrie du dessin, mais c'est essentiellement parce que quatre des cinq filières solaires d'avenir **convergent** sur des conversions électrochimiques. Si on ajoute les deux filières solaires thermodynamiques du paragraphe précédent où l'on retrouve la conversion électrochimique pour le stockage d'énergie (Fig. 3), cela fait six filières sur sept.

Lorsqu'on compare ce projet solaire avec les filières énergétiques qui dominent actuellement (fig.1), on voit que la différence est fondamentale : dans cette figure 1, et aussi dans la figure 2, la conversion électrochimique d'énergie est totalement absente pour la production d'énergie électrique et mécanique. On peut se demander pourquoi.

Un petit rappel historique permet d'éclairer la question.

IV. A.2. Trois filières

Depuis l'origine de l'Humanité, on connaît, par le vécu quotidien, l'importance primordiale de **l'énergie mécanique de mouvement**. C'est d'ailleurs là que se situe l'étymologie du mot « énergie » (du grec ancien : « energeia » = force en action).

L'importance, tout aussi essentielle, de **l'énergie chimique** est peut-être moins évidente pour chacun.

C'est une énergie cachée, potentielle. C'est pourtant l'énergie de nos aliments, et aussi celle du bois que l'on brûle pour produire de la chaleur, et celle de la bougie pour la lumière.

De l'énergie chimique à l'énergie mécanique, il n'y a que **trois chemins possibles** :

1. La **voie biologique** de **l'énergie musculaire**, humaine et animale, utilisée depuis la nuit des temps (Fig. 5, flèches 1) et deux voies techniques.
2. la voie ou **filière thermodynamique** (Fig. 5, flèches 2 et Fig. 1) largement utilisée depuis la machine à vapeur et les différents types de **moteurs thermiques**.
3. La voie ou **filière électrochimique** (Fig. 5, flèches 3 ; Fig. 3 et Fig. 4) de la **pile** alimentant un **moteur électrique**.

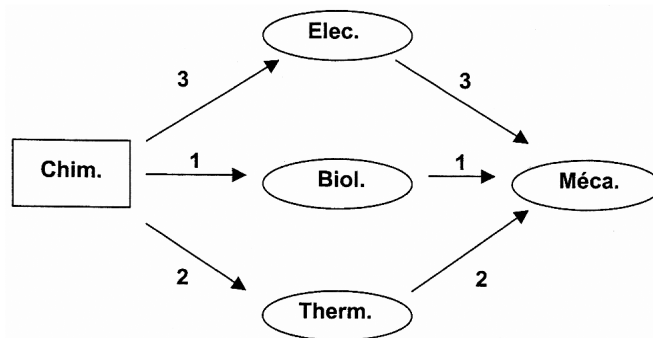


Fig. 5.

IV. A.3. Prophétie

C'est à propos de ces deux filières techniques (Fig. 5, flèches 2 et 3) que se situe un fait historique remarquable.

Le dernier quart du 19^e siècle a vu la naissance de l'automobile. Dans les années 1890, il y avait 50% de voitures électriques et 50% de voitures à moteur thermique (à explosion ou à vapeur).

En 1894, le physico-chimiste allemand Wilhelm OSTWALD (prix Nobel 1909) a comparé les deux filières énergétiques de propulsion de ces voitures : la filière thermodynamique des moteurs thermiques et la filière électrochimique des moteurs électriques. De cette comparaison, il a tiré deux conclusions importantes :

1. Le rendement énergétique de la filière électrochimique est intrinsèquement meilleur que celui de la filière thermique.
2. Si l'on développe la technologie thermique plutôt que l'autre, l'air des villes finira par subir des pollutions intolérables !⁷

⁷ cité par J. O'M. BOCKRIS : « Electrochemistry of Cleaner Environments », p. 2, Plenum Press, N.Y., 1972.

OSTWALD avait vu juste ; malheureusement sa prophétie n'a pas eu d'effet sur le choix technologique ; et la filière thermodynamique, intrinsèquement polluante et gaspilleuse d'énergie a été développée en priorité !

Était-ce vraiment un choix délibéré... ou simplement la solution de facilité ?

N'était-ce pas la ligne de plus grande pente économique et technique ?

Une étude historique approfondie serait nécessaire pour répondre à ces questions.

IV. B. GENERATEURS ELECTROCHIMIQUES

Comment fonctionne la **filière électrochimique** qu'il s'agit maintenant de développer ?

Elle comprend, avant le moteur électrique, un **générateur électrochimique** d'énergie électrique à partir d'énergie chimique.

IV. B.1. Trois types de générateurs

Ce sont :

l'accumulateur, la pile classique et la pile à combustion électrochimique.

Dans ces trois cas, l'énergie chimique d'une réserve de matières réactives donne directement de l'énergie électrique par conversion électrochimique lors du fonctionnement.

L'**accumulateur**^{8,9} n'est générateur que lors de sa décharge, mais il doit être rechargé électriquement, ce qui est nécessairement lent et requiert une source extérieure d'électricité.

Ce n'est donc qu'un « stockeur » d'énergie électrique comme son nom l'indique.

La **pile classique** est un **système chimiquement fermé**, non rechargeable.

Les réactifs, porteurs d'énergie chimique, y sont introduits en une fois lors de la fabrication. Lorsque, à la fin de leur réaction, leur énergie est épuisée, on remplace la pile. Celle-ci a deux fonctions rigide­ment liées : **réservoir d'énergie** et **convertisseur d'énergie**.

La **pile à combustion**, au contraire, est alimentée en réactifs au fur et à mesure de son fonctionnement, de façon permanente ou périodique.

L'élimination des produits de réaction se fait de la même manière.

Cette pile est uniquement un **convertisseur d'énergie**, d'une certaine puissance, **indépendant du réservoir d'énergie**, d'une certaine capacité, qui lui est **extérieur**. C'est donc un **système ouvert**, à **recharge chimique** permanente ou rapide.

Dans les deux types de pile, la nature des phénomènes est la même, mais c'est dans la **distinction entre systèmes chimiquement ouvert et fermé** que se situe la différence, et non dans les appellations qui, elles, ont une origine historique.

IV. B.2. Différence d'appellation

Le nom de la **pile** classique vient de son inventeur, VOLTA (1800) qui **empilait** des rondelles de deux métaux différents en alternance, chaque paire étant séparée par une rondelle de feutre imbibée d'eau salée.

La réaction qui a lieu dans une pile en fonctionnement est ce que les chimistes appellent une oxydoréduction spontanée productrice d'énergie. Elle se passe entre un réactif réducteur et un réactif oxydant.

⁸ On dit aussi « *batterie* », ce qui signifie : « *groupe de* ». Ainsi, une « *batterie* » de 12 volts est un groupe de 6 accumulateurs de 2 volts en série.

⁹ Depuis quelques années, on fabrique et on vend, sous le nom regrettable de « *pile rechargeable* », de petits accumulateurs de même format que les piles classiques. Cette appellation est regrettable parce qu'elle mène au risque d'accident (explosion) si, par confusion, on essaie de recharger une pile classique. L'inscription « *accumulateur* » éviterait cette confusion.

La combustion répond exactement à la même définition.

Lorsqu'elle est thermique, elle produit de la chaleur et quand elle est électrochimique, elle donne du courant électrique.

La **pile à combustion**, inventée par l'anglais GROVE en 1838, avait, comme réactif réducteur, l'hydrogène, considéré par ailleurs comme un combustible, et comme réactif oxydant, l'oxygène, le comburant habituel des combustions. D'où le nom de « pile à combustion » (Fuel Cell).

Dans la **pile classique**, par exemple la « pile LECLANCHÉ », encore la plus utilisée actuellement, le réactif réducteur est le zinc, que l'on n'a pas l'habitude d'appeler combustible, et le réactif oxydant est le dioxyde de manganèse, que le langage courant ne dénomme pas comburant.

On voit donc que, dans les deux types de piles, si les appellations sont différentes, malgré la nature identique des processus, cela résulte simplement de l'histoire du langage et des inventions.

IV. C. DEUX MODES DE COMBUSTION

Ayant vu comment la **pile à combustion électrochimique** – système chimiquement **ouvert** – se distingue de la **pile classique** – système chimiquement **fermé** – voyons maintenant ce qui différencie la **combustion électrochimique**, dans la pile, de la **combustion thermique** dans la flamme ou l'explosion.

Dans toute combustion – réaction chimique spontanée d'oxydoréduction – des **électrons** sont **transférés** des molécules réductrices du combustible aux molécules oxydantes du comburant.

Dans la **combustion thermique**, ces transferts d'électrons se font directement, sans intermédiaire, de molécule à molécule, dans tous les sens (chaos microscopique), dans le volume de la flamme ou de l'explosion ; la réaction est désordonnée et ne peut donner qu'une forme désordonnée d'énergie : la **chaleur**.

Dans la **combustion électrochimique**, le dispositif matériel de la pile¹⁰ empêche les molécules du combustible de rencontrer directement les molécules du comburant et ne permet les transferts d'électrons que par l'intermédiaire de la **surface** des électrodes :

Les molécules réductrices du combustible cèdent des électrons à l'une des deux électrodes, appelée « anode » ; ces molécules sont ainsi oxydées.

Ces électrons se déplacent vers l'autre électrode par un circuit électrique extérieur où leur circulation constitue un courant électrique utilisable.

Arrivés à l'autre électrode, appelée « cathode », ces électrons sont pris par les molécules oxydantes du comburant qui sont ainsi réduites. Le circuit électrique est fermé par la migration des ions dans l'électrolyte de la pile.

L'**énergie électrique** obtenue est donc liée au caractère ordonné de la réaction où le transfert d'électrons est canalisé.

Il convient ici d'attirer l'attention sur le fait que la **combustion thermique** se passe dans un **volume**, à haute température, tandis que la **combustion électrochimique** a lieu à la **surface** des électrodes à température modérée.

Or, lorsqu'une réaction produit de la chaleur, une partie de cette chaleur se perd par la surface de la zone réactionnelle, malgré toutes les précautions que l'on peut prendre. Cela diminue le rendement énergétique du processus.

Lorsque la **zone réactionnelle** est un **volume**, le rapport de la surface (par où se font les pertes) au volume (où se produit la chaleur) diminue quand on augmente le volume.

¹⁰ membrane échangeuse d'ions et/ou électrodes poreuses.

Par exemple, si on double les dimensions linéaires, la surface est multipliée par 4, tandis que le volume est multiplié par 8 ; le rapport de la surface au volume est donc divisé par deux, ce qui augmente le rendement énergétique du processus. C'est ce qu'on appelle « l'effet de taille »¹¹. Il pousse à construire des installations aussi grandes que possible, d'où la tendance actuelle à la centralisation.

Dans le cas de la **combustion électrochimique**, l'énergie de réaction donne surtout de l'électricité et un peu de chaleur de dégradation comme sous-produit. Mais la différence essentielle avec le cas précédent est qu'ici, la **zone réactionnelle** est une surface. Il n'y a donc **pas d'effet de taille** : cent électrodes de 1 dm² dans des équipements séparés, par exemple, ont le même rendement énergétique qu'une seule électrode de 1m² dans une installation centrale.

Nous verrons que cela a des conséquences très importantes

IV. D. CARACTERISTIQUES DES PILES A COMBUSTION ELECTROCHIMIQUE

Les caractéristiques des piles à combustion se situent entièrement hors du cadre de la technologie énergétique actuelle. Elles confèrent à la filière électrochimique une série d'avantages remarquables :

1. Les piles à combustion électrochimique sont **propres** ; elles peuvent fonctionner **sans pollution** aucune, si on le veut¹², grâce à l'élimination de la combustion thermique avec son cortège habituel de pollutions.
2. Elles sont facilement **décentralisables** car sans « effet de taille ».
3. Elles se prêtent donc à la « **cogénération** » effective d'électricité et de chaleur près des lieux d'utilisation.
4. Grâce à cette cogénération et à l'absence de conversion thermo-dynamique, donc de « limite de CARNOT », elles **économisent l'énergie**.
5. Elles sont d'une grande **souplesse d'utilisation** car, d'une part, leur puissance est indépendante de leur capacité énergétique et, d'autre part, l'absence « d'effet de taille » permet une conception modulaire pour leur fabrication et leur utilisation. Des modules standardisés peuvent être fabriqués en grandes séries et assemblés librement en série ou en parallèle, avec des réservoirs de combustible de capacités adéquates, selon les besoins de l'utilisation.
6. Elles peuvent fonctionner sur des combustibles dérivés des **énergies du Soleil**.
7. Elles seront utilisables dans des **véhicules électriques** et des **installations électriques autonomes de toutes puissances**.

Ces caractéristiques m'ont donné, depuis longtemps, la ferme conviction qu'il serait possible d'envisager le développement progressif d'un système énergétique mondial entièrement nouveau, propre, durable, économe, souple et décentralisé, qui pourrait, à terme, remplacer complètement le système actuel qui s'est avéré polluant, non durable, gaspilleur, rigide et centralisé, donc fragile comme l'ont montré plusieurs pannes d'électricité de grande étendue en Europe et en Amérique.

Dans ce nouveau système, le stockage, le transport et la distribution d'énergie se ferait sous forme de combustibles (électrochimiques, renouvelables), ce qui est nettement moins coûteux que le transport par lignes électriques à haute tension.

V. BIFURQUER

On peut résumer l'essentiel de ce qui précède en disant que ce « projet électrochimique solaire » permettra une utilisation judicieuse des sources et filières énergétiques dérivées du Soleil.

¹¹ On dit aussi : « effet d'échelle ».

¹² C'est-à-dire si elles s'inscrivent dans l'une des filières solaires d'avenir (Fig. 4).

En effet, cette utilisation sera, à la fois :

1. perpétuellement renouvelable,
2. quantitativement suffisante,
3. techniquement possible,
4. écologiquement acceptable,
5. socialement souhaitable,
6. économiquement accessible

V. A. DECISION

Passer des sources et filières énergétiques actuelles à celles qui dérivent du Soleil, cela constitue une **bifurcation** de très grande envergure nécessaire parce que notre civilisation est en **crise** et que les dangers sont extrêmes.

L'idée de crise, à côté de son apparence négative, peut aussi présenter un aspect positif :

- le mot « **crise** » vient du grec « *Krisis* » qui signifie « **décision** ». La crise est un moment décisif dans une évolution.
- en chinois, la crise est désignée par le mot « *wei-chi* » ; « *wei* » signifie : « *attention, danger* » et « **chi** » représente une « *occasion de changement* ».

Les dangers qui composent la crise actuelle peuvent être une **occasion décisive de changer de direction**, de quitter la voie sans issue où nous sommes engagés pour **bifurquer** vers un autre chemin prometteur qu'il faudra construire avec volonté, audace et courage.

En fait, si l'on en juge par certains débuts de réalisations déjà existants dans différents pays, la bifurcation est déjà amorcée :

Eoliennes, installations diverses de chauffage solaire, voitures électriques sur le marché ou en prototypes dans toutes les grandes marques, cellules photovoltaïques, filière bois, installations pilotes de piles à combustion en différents points du monde, dont une de 250 kW à l'Université de Liège... sans compter, évidemment, les piles à hydrogène alimentant tous les instruments de bord des modules spatiaux qui ont permis d'aller sur la Lune dès 1969.

V. B. RECHERCHE

Il faut maintenant approfondir et accélérer cette bifurcation ; étendre et amplifier les **recherches** dans différentes directions :

- étude de scénarios possibles pour résoudre le problème de la discordance de **répartition géographique** entre les divers apports d'énergie dérivés du Soleil d'une part, et les besoins énergétiques d'autre part ;
- recherche de mise au point technique et de développement ;
- recherche fondamentale sur la **catalyse électrochimique**.

Cette recherche sur « **l'électrocatalyse** » est indispensable, non seulement pour améliorer la densité de puissance ou « puissance spécifique » (en W/kg ou en W/dm³) des piles à combustion, mais surtout et avant tout pour remplacer le catalyseur le plus employé actuellement, le platine.

En effet, les réserves mondiales de ce métal précieux sont très limitées et manifestement insuffisantes pour l'avenir. Le platine est également le catalyseur employé dans les « pots catalytiques » des voitures actuelles, et l'on estime que les réserves de platine sont trop faibles pour équiper tout le parc automobile mondial actuel. Ce sera, à fortiori, la même chose pour le développement des piles à combustion.

Il existe un bon nombre d'idées et de pistes de recherches intéressantes pour découvrir, inventer, développer de nouveaux catalyseurs électrochimiques, et l'espoir est parfaitement permis de résoudre le problème, à condition de vouloir y mettre les moyens.

En résumé, je pense que pour développer et répandre cette technologie électrochimique propre, il faut remplir les **conditions** suivantes :

- a) Le public et les décideurs doivent prendre conscience que les piles à combustion permettent de relever le défi, mais qu'il est urgent de s'y mettre, car il faudra du **temps**.
- b) Du **temps** pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques que je viens d'énumérer.
- c) Du **temps** pour les **recherches** nécessaires.
- d) Mais il faudra aussi des **budgets** de recherche assez importants pour être à la hauteur des possibilités en vue et de l'enjeu pour notre civilisation.
- e) Des **chercheurs** en plus grand nombre devront être formés dans le domaine de la conversion électrochimique d'énergie.
- f) Cela requiert un **enseignement** plus développé de ce domaine dans les universités, les écoles techniques et dans le secondaire.

Il importe ici de veiller à ne pas confondre ce domaine de la conversion électrochimique d'énergie avec celui de l'électrochimie analytique. Ce dernier, en effet, est déjà bien développé et totalement différent dans ses buts, ses méthodes et ses façons de penser.

V. C. OBSTACLES

Bifurquer, c'est indispensable, mais ça ne se fera pas sans difficulté, car il y aura des obstacles à surmonter.

Tout d'abord, le **désir de garder le système actuel** est très fort, et on connaît la puissance des intérêts privés, des lobbies et autres groupes de pression pour le défendre.

Ensuite, le nouveau système, encore dans l'enfance est en **compétition économique** avec le système actuel qui bénéficie de plus d'un siècle de recherche, développement et production de masse.

Mais on sait, historiquement, que le prix des techniques nouvelles a toujours été très élevé au début, puis a diminué progressivement au fur et à mesure de leur développement.

En face de cela, le prix des combustibles fossiles ne peut qu'augmenter en s'approchant de l'épuisement. Les deux courbes, descendante et ascendante, finiront donc nécessairement par se croiser.

L'influence considérable du désir de garder le système actuel est encore attesté par plusieurs projets décrits dans « Le monde diplomatique » (Juillet 2002, p. 9) sous le titre : « Les apprentis sorciers du climat » : « Des bureaux d'études prétendent résoudre le problème de l'effet de serre de plusieurs manières :

- 1. en accélérant, par de la poussière de fer, la production océanique d'algues ou de phytoplancton, gros consommateurs de gaz carboniques ;
- 2. en séquestrant ce gaz dans des fonds marins ou des cavités souterraines ;
- 3. en diminuant le rayonnement solaire reçu par la Terre au moyen d'aérosols répandus en haute atmosphère.

Ces différentes études misent sur de fortes retombées financières d'éventuels marchés de la dépollution. Mais les chances de maîtriser ces processus sont extrêmement faibles. ».

Ces projets d'expérimentation, outre leur danger potentiel, ne font que traiter le problème en aval et retarderont l'indispensable et urgente bifurcation vers les énergies du Soleil.

D'autres obstacles peuvent venir de **l'ignorance**.

Dans l'opinion publique, jusqu'à présent, la nécessité de bifurquer n'est pas évidente pour tous, car nombreux sont ceux et celles qui ne comprennent pas encore suffisamment la gravité de la situation et son issue inéluctable.

La **routine**, l'habitude, la tradition et les **préjugés** de l'époque, ainsi que la difficulté de voir plus loin que le court terme, sont souvent des obstacles également.

La **peur** peut fréquemment jouer un rôle de frein : peur du changement en général, peur de l'inconnu, peur des efforts parfois nécessaires pour s'adapter, peur de changer d'habitude, peur de perdre un certain confort ou l'un ou l'autre avantage acquis, etc...

V. D. EVOLUTION DES MENTALITES

Ceux qui ont vu l'arrivée du premier homme sur la Lune se souviennent du choc émotionnel provoqué par la photo de la Terre vue de la Lune. Cette belle petite « perle bleue », c'est notre unique oasis dans l'Univers, nous n'en avons pas de rechange, c'est notre bien commun, c'est notre milieu de vie, il est fragile, il ne faut pas le détruire.

Or, on se rend compte maintenant que notre civilisation industrielle, au point où elle en est arrivée, est en train d'agir sur ce milieu de vie comme un cancer dans un organisme vivant.

La prise de conscience de ce grave danger peut agir comme un second choc émotionnel sur l'opinion publique si celle-ci est sensibilisée et mobilisée par une information compréhensible, forte et persistante.

Il s'agit d'expliquer sans relâche et de façon répétée, en montrant à chaque occasion, les liens qu'il peut y avoir entre l'actualité et l'espoir des solutions possibles, en présentant les difficultés de la mutation nécessaire comme des défis à relever.

Dans ce domaine, les enseignants ont un rôle absolument essentiel à jouer, à côté des médias, des livres, d'Internet et du bouche à oreille qui est toujours influent.

V. E. QUEL DELAI ?

La bifurcation dont il s'agit constitue un travail de très longue haleine, aux multiples aspects, et qui devra être mené avec détermination et opiniâtreté.

Néanmoins, il est essentiel que, sans attendre le remplacement général des sources et filières énergétiques actuelles, un scénario volontariste mette l'accent sur les économies d'énergie grâce à la promotion, d'une part de « l'efficacité énergétique » sur le plan technique et, d'autre part de « l'efficience énergétique » sur le plan des comportements et des coûts.

Par ailleurs, Jean-Pascal VAN YPERSELE, climatologue, déclare :

« Il importe que nous ayons un plan stratégique à long terme, 50 ans au moins »¹³.

Jean-Marie PELT, Président de l'Institut européen d'écologie, écrit :

« Les reconversions, dans le domaine énergétique, s'étalent sur plusieurs générations. »¹⁴

Peter RUSSEL, physicien, écrivait en 1982 :

« Nous avons les connaissances et à peu près toutes les compétences techniques nécessaires pour passer, en dix ans, des combustibles fossiles aux énergies du Soleil.

Cependant, dans les nations développées, le budget recherche et développement pour les sources renouvelables est inférieur à 1% de celui consacré à prolonger notre dépendance des ressources en voie d'épuisement rapide ! »¹⁵

Le même auteur cite un exemple d'erreur de prédiction relative au projet d'envoyer un homme sur la Lune :

¹³ Revue « Imagine », n° 35, Juillet 2002, p. 16.

¹⁴ « La Terre en héritage », Fayard, 2000, p. 105.

¹⁵ Peter RUSSEL : « The awakening Earth », Arkana, London, 1982, 1988, p. 114.

« Un article du « Science Digest » de 1948 déclarait que cela présentait tellement de problèmes qu'il faudrait bien 200 ans pour y arriver ».

« En 1954, une conférence d'éminents scientifiques en Angleterre est arrivé, après de longues discussions, à une conclusion similaire bien qu'un peu moins pessimiste. Ils ont déclaré que nous ne verrons pas un homme sur la Lune avant l'an 2000. »

« Mais, 15 ans plus tard, le 21 juillet 1969, Neil ARMSTRONG mettait le pied sur la Lune. »¹⁶

Je ne puis pas m'empêcher de penser que, dans ce cas, le facteur décisif a été une volonté forte et déterminée de « mettre le paquet ».

VI. CONCLUSION

Face aux constats menant à l'inquiétude dans laquelle nous baignons, il est grand temps de réagir en recadrant la vision pessimiste vers une image plus positive de l'avenir.

Il est vrai, en effet, que notre représentation du futur joue un rôle dans la création de ce futur. Une attitude optimiste, une vision positive d'une perspective d'avenir à laquelle nous croyons peuvent nous aider à promouvoir un monde meilleur.

De fait, l'être humain est le seul qui sait que demain existera ; il peut donc faire des **projets**.

Ce qu'il nous faut, ce sont des **projets mobilisateurs**, crédibles, capables de faire rêver, penser, puis passer à l'action, **car nous sommes tous concernés**.

Durant mes années de travail enthousiasmant avec mes étudiants à l'Université de Liège, sur la conversion électrochimique des énergies du Soleil, j'ai eu la chance de pouvoir développer et conserver la conviction que ce **projet** trouvera à se réaliser **pour** contribuer à **sortir de l'impasse** énergétique actuelle.

Entre la démission pessimiste et le pari pour l'avenir, je préfère le pari que les citoyens du monde parviendront progressivement à se mobiliser suffisamment pour inventer un mode de vie plus sage.

Cet optimisme, lucide et volontaire, est construit sur la vision des possibilités.

C'est un pari, mais il peut aussi susciter chez nos élèves, nos enfants, nos petits-enfants, des **projets** bien exaltants pour le millénaire qui commence.

x x x

¹⁶ ibidem, p.164.