Nicola Armaroli

Vincenzo Balzani

De l'énergie pour l'astronef Terre

Combien en utilisons nous, comment se compare la production, que nous réserve l'avenir

À Claudia et Carla

La réalité a l'habitude déconcertante de nous obliger à faire face à un imprévu que nous n'avions pas prévu.

Hannah Arendt

Traduction : Charles Hirlimann

Table des Matières

INTRODUCTION

Qu'est-ce que l'énergie ? 4

Hier et aujourd'hui1 8

Combien d'énergie gaspillons nous ? 32

Combien d'énergie nous reste-t-il dans la cale ? 43

Dommages collatéraux 56

Énergie de l'atome 66

L'énergie du Soleil 84

Énergie de l'air, l'eau et la Terre 98

Scénarios pour un futur possible 111

INTRODUCTION

Si, sur nos routes circulent plus de 30 modèles de voitures de cylindrée moyenne et si à Cambridge il n'existe pas de maison sans piscine, nonobstant le climat anglais, alors c'est que notre système économique est tombé sur la tête.
George Steiner

Que dois-je faire si une de mes chaussure s'abime ? Avec l'autre encore bonne je peux foncer au centre commercial le plus proche et choisir une paire neuve parmi la centaine de modèles disponibles. Grâce au ciel je peux exprimer ma liberté de consommateur.

L'alternative qui consisterait à chercher un cordonnier, qui aurait l'intérêt en réparant la chaussure de faire des économies de consommation d'eau et d'énergie et de diminuer la production de déchets, n'est généralement prise en compte par personne car il est souvent difficile de trouver un cordonnier et que d'autre part la réparation aurait toutes les chances de couter plus cher qu'une paire neuve. Ce comportement consumériste qui nous a conduit à une civilisation du « jeter après usage » n'est-il pas la source des maux de notre société ?

Le philosophe Umberto Galimberti a écrit que le consumérisme est « le premier des péchés capitaux de notre époque », que c'est un modèle de développement « qui offre un faux bien-être basé sur la destruction des ressources naturelles et l'exploitation des personnes ».

Et si, au lieu de se laisser éblouir par l'éclat du consumérisme, on essayait maintenant de regarder dans les coulisses pour voir les choses dans leur réalité ? Vous découvrirez ainsi, que les nouvelles chaussures que vous venez d'acheter sont fabriquées avec des matériaux (plastiques, orles, vernis) qui sont fabriqués à partir de combustibles fossiles, en consommant de l'énergie qui est elle-même obtenue à partir de combustibles fossiles. Vous découvrirez aussi que pour produire ces chaussures il a aussi fallu produire de nombreux déchets auxquels s'ajoutent la vieille paire de chaussure que vous avez aussi jetée. Vous découvrirez enfin que les belles chaussures neuves ont été fabriquées par des travailleurs sous-payés et mal protégés, parfois même par des mineurs, dans des pays où la pollution atteint souvent des niveaux insoutenables.

En achetant ces nouvelles chaussures je pensais exercer ma liberté de choix, mais il se trouve que j'ai justement pris les chaussures qui dans un spot publicitaire vu à la télé sont censées « vous rendre la joie de marcher ». Et bien sûr j'ai remmené mes chaussures dans une boîte en carton avec quelques feuilles de papier, produits avec le bois des arbres, et un sac plastique, fabriqué, une fois encore avec des combustibles fossiles. Il fort probable qu'en jetant cet emballage je ne respecte pas scrupuleusement le tri sélectif.

Ce discours sur une paire de chaussures s'inscrit bien sûr dans le cadre général de la consommation des ressources et de la production de déchets qu'on retrouve chaque fois qu'on utilise un ordinateur, un téléphone, un téléviseur ou même un quand on mange du jambon !

Dans les coulisses des 5500 supermarchés français plus de 40 000 tonnes de produits alimentaires sont jetés tous les ans parce qu'il approchent de leur date de péremption. Une meilleure organisation permettrait de les consommer sans danger.

Notre modèle de développement est basé sur le cercle vicieux production-consommation : les produits sont fabriqués pour répondre aux besoins, mais également pour assurer la continuité de la production des marchandises. Celles-ci doivent être consommées rapidement pour pouvoir être remplacées ; elles doivent être suffisamment fragiles pour qu'on doivent les changer mais pas trop pour qu'on ait envi de les acheter. On assure l'absence de pièces de rechange où on les vend à un prix prohibitif qui décourage la réparation.

Au cas où vous ne ressentiriez pas le besoin de changer un produit , la publicité se charge de vous pousser à le détruire pour faire de la place à la dernière nouveauté. La publicité crée la mode, une autre stratégie pour vaincre la résistance des objets à la destruction, une stratégie qui rend socialement inacceptables des objets encore utilisables. À chaque fois qu'on utilise des ressources pour produire un objet (une voiture, par exemple) ou pour mettre en œuvre un service (comme le chauffage de l'eau d'une piscine) on produit aussi une quantité de déchets qui occupent souvent un volume supérieur à celui des ressources utilisées. Suivant leur état de compaction, les déchets s'accumulent comme des excroissances à la surface de la Terre, avant de rejoindre les eaux superficielles ou profondes ou de se répandre dans l'atmosphère quand ils sont gazeux. Comme nous le savons bien aujourd'hui, le problème du stockage et du devenir des déchets sont de plus en plus complexes.

À la fin des processus de production des biens et des services l'environnement naturel voit son contenu original diminué, mais il se trouve aussi « élargi » (nous ne pouvons quand même pas dire «enrichi») d'une quantité importante de corps étrangers solides, liquides et gazeux. Ces substances modifient le sol, l'eau et l'atmosphère, les rendant moins susceptibles d'être utilisés pour des fonctions vitales, et aussi moins à même de soutenir l'économie elle-même que les ressources naturelles vivantes.

Malheureusement, tous les appels pour réduire la consommation, à commencer par celle de l'énergie, contrastent avec l'idée dominante aujourd'hui - appuyée par de nombreux économistes et approuvée par la plus grande partie des hommes politiques - qu'il est nécessaire que le produit intérieur brut (PIB) du pays augmente d'au moins 2-3% par an. On oublie, cependant, qu'une augmentation du PIB implique une augmentation de la consommation des ressources et la production de déchets et que la seconde loi de la thermodynamique nous enseigne qu'il est impossible de créer le mouvement perpétuel et donc impossible d'avoir un développement infini fondé sur des ressources implacablement en quantités finies.

C'est une réalité à laquelle l'économie et la politique devront se résigner à faire face.

A ce stade, vous vous demandez : vais-je entendre toujours cette même rengaine ou bien vais-je vraiment lire un livre sur l'énergie ? N'ayez pas peur, nous n'avons pas triché. Dans ce qui suit nous discutons de ce que vous attendez : de la liaison chimique à la loi d'Einstein, du charbon à l'énergie nucléaire, de l'obésité alimentaire à l'énergie solaire.

Mais nous devons insister dès maintenant sur le fait que l'énergie est quelque chose de vraiment crucial pour comprendre le monde dans lequel nous vivons. C'est la grande disponibilité de l'énergie qui nous permet de mener une vie infiniment plus confortable que la vie de nos grands-parents. En même temps, cependant, notre mode de vie peut aggraver la dégradation de la planète et compromettre gravement la qualité de vie de nos petits-enfants.

L'humanité fait face à un immense défi, qui est en même temps une chance, celui de développer de nouvelles technologies énergétiques durables pour tenter de combattre les principaux problèmes qui l'affligent. Connaître les lois fondamentales de l'énergie, et quelques informations de base sur le système énergétique actuel, avoir une idée des perspectives de nouvelles technologies peuvent nous aider à devenir plus conscients et responsables.

Après avoir lu ce livre, vous serez peut-être tenté de porter une chaussure abimée à réparer ou même, qui sait, de la réparer vous-même.

CHAPITRE 1

Qu'est-ce que l'énergie ?

Il n'est pas nécessaire de tout savoir pour connaître quelque chose.
James D. Barrow_

Vous lisez un livre ; fermez les yeux et restez immobile pendant quelques secondes.

Peut-être pensez-vous que dans ces conditions vous ne consommez pas d'énergie. Ce n'est pas vrai : vous respirez, votre cerveau fonctionne, votre cœur bat, votre corps a certainement une température différente de celle de l'endroit où vous vous trouvez.Tout cela coûte de l'énergie, celle que vous avez ingérée avec le petit déjeuner de ce matin, le dîner d'hier soir ou qui est prélevée dans une des réserves de graisse accumulée dans certaines parties du corps.

Si plus tard vous faites un peu de sport, à la fin vous éprouverez un grand sentiment de bien-être : l'effort stimule la libération d'endocrines, des neurotransmetteurs qui induisent le plaisir. Mais votre contenu énergétique après un bon bain à la piscine est plus faible qu'il n'était avant. Ne croyez pas que la douche « énergisante » peut vous recharger : il vaut mieux aller manger quelque chose.

Si vous y allez en voiture et que vous vous arrêtez pour faire le plein vous vous plaindrez de l'augmentation récente du coût des carburants. Peut-être aurez vous soif après avoir désaltéré votre voiture. En rentrant chez vous achetez une bouteille d'eau fraîche. Remarquez qu'un litre d'eau minérale est plus cher qu'un litre d'essence. Et pourtant 66% du prix du carburant est versé au Trésor (dans le cas de l'eau l'Etat ne prélève que 5,5% ...). Mais habituellement, nous ne le remarquons même pas et nous ne nous en plaignons pas.

Une fois rentré, il est temps de prendre une collation bien méritée : une banane et un kiwi. L'étiquette vous informe que la première est en provenance de Guadeloupe, le deuxième de Nouvelle-Zélande. Pour arriver sur votre table ces fruits ont voyagé sur des milliers de kilomètres. Vous en appréciez le goût et vous vous sentez mieux quand vous les avez mangés. Maintenant, allumez votre PC, vous pouvez terminer ce travail que vous aviez commencé.

On ne peut pas se plaindre, ce n'était pas une mauvaise après-midi. En peu de temps vous avez eu diverses activités toutes agréables : lire un livre, nager, conduire, manger, travailler en position assise à la maison.

Tout cela a été possible grâce à la disponibilité d'énormes quantités d'énergie, dont vous ne vous êtes probablement pas rendu compte : l'énergie des cellules de l'organisme, celle de la chaudière de la piscine, le carburant du réservoir de la voiture, celui du navire qui a traversé les océans et le réseau d'électricité.

Si quelqu'un vous demande maintenant ce qu'est l'énergie, peut-être auriez-vous

quelques difficultés à définir de manière claire et rigoureuse cette entité omniprésente dans nos vies. C'est gênant car généralement, nous aimons savoir ce qui nous entoure et nous avons tendance à nous méfier de ce que nous ne connaissons pas.

Il ne faut pas trop s'en faire, cependant car l'énergie est incomprise de manière générale, bien que compréhensible. L'énergie est un concept difficile à saisir, et seulement intuitif en apparence. Il est si complexe que pendant des millénaires, les chercheurs en ont donné des définitions vagues ou complètement fausses, comme celle figurant dans la septième édition de l'Enciplopedia Britannica de 1842 : « the power, virtue, and efficacy of a thing » (la puissance, la propriété et l'efficacité d'une chose)

Si nous sommes arrivés à comprendre, pas à pas ce qu'est l'énergie et qu'elles sont les lois qui la régissent, c'est grâce au travail passionné et aux intuitions d'un petit groupe d'hommes curieux qui, dès la fin du XVIIe siècle se sont attaqués avec dévouement au problème : James Watt, Sadi Carnot, Justus von Liebig, James Joule, Rudolf Clausius, William Thomson (mieux connu sous le nom de Lord Kelvin), Ludwig Boltzmann, Walther Nernst et Albert Einstein.

L'énergie et ses parents

L'énergie n'est pas un concept premier. Avant de comprendre ce qu'est l'énergie il nous faut définir un concept qui le précède : le travail.

Le travail est une quantité qui apparaît lorsqu'une force déplace quelque chose. La quantité de travail mise en jeux dans ce déplacement dépend de la valeur de la force utilisée et de la distance sur laquelle l'objet considéré se déplace. Du point de vue mathématique le travail est le produit d'une force par une longueur.

Déterminons le travail développé lorsque nous soulevons une masse contre la force de gravité, par exemple une caisse de pommes. L'ampleur de notre travail dépend de la masse à déplacer (du nombre de pommes dans la caisse), de la valeur de la force gravitationnelle (qui n'est pas la même suivant que nous sommes sur la Terre ou sur la Lune).

Souvent, la masse est celle de notre corps : par exemple quel est le travail développé lorsque l'on monte une échelle. Comme la force de gravité est identique dans la Vallée d'Aoste et dans les Abruzzes, et la masse à déplacer constante depuis des années (nous gardons la ligne), le travail à accomplir est plus grand si l'on monte jusqu'au sommet du Mont-Blanc, à 4810 mètres, plutôt que sur le Gran Sasso, à 2912 mètres. Si l'on n'arrive pas à soulever quelque chose (comme tenter de lever une jeep à bout de bras) alors aucun travail n'est accompli. En langage courant, « travail » signifie autre chose. Aussi bien un portefaix qu'un notaire sont des travailleurs ; d'un point de vue scientifique le portefaix travaille beaucoup plus que le notaire, même si cela ne peut pas se deviner en comparant leurs niveaux de vie. Mais ici, en fait, la science n'est pas impliquée.

Comment peut-on décrire la capacité d'un système (un litre d'essence, un être

vivant, une pierre qui tombe, une voiture ...) d'effectuer un travail ? Quel est le paramètre qui quantifie cette capacité ? Cette capacité à effectuer un travail est l'énergie. Elle ne doit pas être confondue avec la puissance, qui décrit la vitesse d'utilisation de l'énergie, ou la relation mathématique entre l'énergie et de temps.

Deux athlètes de masses corporelles similaires qui se confrontent dans la finale du 100 mètres olympique effectuent exactement le même travail, mais celui qui va développer une puissance un peu plus grande arrivera le premier. Et cela suffit pour faire la différence entre la gloire olympique immortelle et l'oubli.

D'autres formes de l'énergie

Essayons, à ce stade, d'aller un peu plus loin en essayant de nous libérer d'un concept purement mécanique du travail qui nous a cependant été d'une grande aide pour commencer à se dégager de l'intuition (le cas des pommes).

Tout processus qui produit un changement (de température, de composition chimique, de vitesse, de position) dans un système (un organisme vivant, un objet inanimé, une machine) est un travail.

La possibilité d'effectuer ce travail, au sens large, se manifeste de plusieurs façons, que nous appelons les formes d'énergie, qui vont bien au-delà de l'énergie musculaire décrite ci-dessus.

Toutes les formes d'énergie, dans leur diversité, ont un point commun : elles sont toujours l'expression d'un système capable d'exercer une force qui peut agir contre une autre force. On distingue sept formes d'énergie, presque toutes trouvées dans notre expérience quotidienne :

- énergie thermique : les radiateurs dans notre habitation,
- énergie chimique : le gaz qui alimente la chaudière,
- énergie électromagnétique ou lumineuse : la lumière du Soleil qui fait pousser la plante dans le pot sur le balcon,
- énergie cinétique : celle du vase qui tombe sur le sol,
- énergie gravitationnelle : si le vase tombe de 10 centimètres de hauteur on pourra peut-être le sauver, s'il tombe de 2 mètres de haut il n'y a pas d'espoir,
- énergie nucléaire : elle est difficile à décrire mais nous en reparlerons.

Souvent, les diverses formes d'énergie peuvent être converties l'une dans l'autre, mais pas toujours. Par exemple, nous pouvons transformer l'énergie lumineuse du soleil en électricité avec un panneau photovoltaïque. Au lieu de cela, contrairement à la croyance populaire, on ne peut pas convertir directement l'énergie nucléaire en électricité. Les centrales nucléaires sont en fait des bouilloires très sophistiquées qui convertissent l'énergie nucléaire en énergie thermique, qui à son tour est convertie en énergie mécanique puis finalement en électricité.

Si vous voulez d'autres exemples de transformation de l'énergie, pensez à votre journée type et laissez aller votre imagination en vous inspirant du tableau 1.

Les sources d'énergie

Les sources d'énergie sont des entités physiques à partir desquelles on peut obtenir une ou plusieurs formes d'énergie. Ces « entités » sont de natures très diverses:

- ressources minérales et végétales : dans le cas du charbon, du pétrole, du gaz et de la biomasse, l'énergie est de type chimique et elle est stockée dans les liaisons chimiques du type carbone-carbone et carbone-hydrogène ; pour la libérer un comburant comme l'oxygène est nécessaire ; dans le cas de l'uranium l'énergie est du type nucléaire et elle est libérée lors de la fragmentation du noyau atomique. L'énergie mise en jeu dans une réaction nucléaire est environ un million de fois plus grande que l'énergie emmagasinée dans une liaison chimique !
-

Table 1 : Diverses formes d'énergie et différents processus ou dispositif qui les transforment l'une dans l'autre

	thermique	chimique	électrique	électrom. lumière	cinétique	nucléaire
thermique		réaction endothermique	processus thermoionique	lampe à filament	moteur à explosion	
chimique	combustion		pile	luciole	muscle	
électrique	résistance électrique	électrolyse		diode électroluminescence	moteur électrique	
éléectrom. lumière	panneau solaire	photosynthèse chlorophylienne	panneau photovoltaïque	luminescence	voile solaire	
cinétique	frottement	réaction radiolytique	alternateur électrique	accélération d'une charge		
nucléaire	fissino fusion	ionisation	?	?	radioactivité	

- Produits manufacturés : si un barrage bloque l'eau d'une rivière on peut transformer l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau en énergie cinétique grâce à une série de tuyaux et de machines, puis en énergie mécanique et électrique ; d'une manière similaire, les éoliennes peuvent convertir l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement ;
- corps célestes : le soleil est une source d'énergie lumineuse, la Terre est une source d'énergie thermique (souterraine) et gravitationnelle (le vase qui tombe).

Il convient de rappeler que les sources d'énergie ne sont pas que cela : avec des combustibles fossiles on produit d'innombrables choses utiles (tels que les matières plastiques, les engrais, les produits pharmaceutiques), avec un barrage nous pouvons contrôler le régime des eaux, de même il n'est pas difficile de voir

que la Terre peut être utile à de nombreuses autres fins.

On appelle sources d'énergie primaires, celles que l'on trouve directement dans la nature, p.ex. les combustibles fossiles, la lumière du soleil, le vent, l'eau qui coule, la végétation, l'uranium. Elles sont utilisées telles quelles ou transformées en d'autres formes d'énergie, dites secondaires, plus aisées à utiliser.

Le pétrole par exemple est une source primaire utilisée pour produire des carburants raffinés (sources secondaires) utilisé à des fins diverses (essence, diesel, kérosène). Le charbon est plutôt une source primaire qui peut être utilisée directement (mais c'est un cas plutôt rare).

Les piliers de l'univers

Les premières études et expériences scientifiques sur la transformation de l'énergie ont été faites il y a plus de deux siècles. Elles étaient basés sur une machine pour transformer la chaleur en mouvement et vice-versa et cette branche de la physique a pris historiquement (et logiquement) le nom de thermodynamique.

Les hommes du XIXe siècle qui ont jeté les fondements de la thermodynamique ont été principalement des Britanniques, des Français et des Allemands qui, en ces années de grands progrès technologiques, ont souvent été motivés par le désir de contribuer au développement et à la suprématie technologique de leur nation.

Les études thermodynamiques menées dans la seconde moitié du XIXe siècle ont permis d'identifier certaines lois fondamentales, ou des principes, dont la validité peut être étendue à toutes les formes d'énergie. En d'autres termes, des scientifiques et des ingénieurs thermodynamiciens de l'époque ont largement et sans s'en rendre compte, largement dépassé la limite de leur ambition. Ils voulaient comprendre le fonctionnement de machines simples et nous ont révélé quelques uns des piliers fondamentaux qui gouvernent l'univers.

Ces principes de la thermodynamique sont si fondamentaux qu'ils sont souvent simplement appelés le Premier et le Deuxième Principe. Et les majuscules ne sont pas des fautes de frappes.

Avant de décrire brièvement les principes, il est peut-être utile d'essayer de clarifier les concepts qui sous-tendent les grandeurs appelées température et chaleur.

Particules en mouvement

L'énergie thermique ou chaleur est une manifestation du mouvement incessant qui agite les atomes, c'est à dire les particules submicroscopiques de la matière.

Comme nous avons tous utilisé un thermomètre nous croyons savoir ce qu'est la température. Toutefois, la notion de température est beaucoup moins triviale qu'il n'y paraît et est rigoureusement décrite par l'énergie cinétique moyenne du mouvement des atomes.

Ici, nous disons simplement que la température est la propriété qui définit la direction du transfert de chaleur d'un système à un autre. L'énergie thermique a tendance à se déplacer du système que nous appelons « à haute température » vers le système « à une température inférieure ». Le transfert de chaleur s'arrête lorsqu'on atteint ce que l'on appelle « l'équilibre thermique ». Quand deux corps sont à la même température, il n'y a pas de transfert de chaleur entre eux.

L'échelle utilisée pour mesurer la température est une simple convention et il n'y a pas encore d'usage universel, le monde se sépare entre l'échelle Celsius et l'échelle Fahrenheit. Ne soyez pas surpris si en arrivant aux États-Unis pendant une tempête de neige vous entendez à la radio que la température extérieure est de 32 degrés (Fahrenheit). Des traités internationaux existent cependant qui imposent l'usage du degré Celsius dans la vie courante pour les mesures de température relatives et du degré Kelvin pour les mesures absolues de la température dans les laboratoires de sciences expérimentales.

La chaleur : l'énergie qui s'échange

La chaleur est l'énergie thermique qui est échangée entre deux corps à température différente. Pendant des millénaires, on pensait que la chaleur est un fluide immatériel (certains y croient peut-être encore…) mais ce n'est pas le cas. Lorsque vous chauffez de l'eau dans une casserole, la flamme ne réchauffe pas directement l'eau : elle réchauffe le fond de la casserole, qui à son tour, réchauffe l'eau. On a un échange de chaleur entre les trois corps flamme, casserole, eau.

Les atomes et les molécules qui composent les flammes forment techniquement un plasma, un gaz très chaud partiellement ionisé et ont donc une très haute température. Ils se déplacent à haute vitesse, tournent et vibrent dans un tourbillonnement sans fin. Ces particules frappent le fond de la casserole stimulant la vibration des atomes de métal (sans les déplacer tant que la casserole ne fond pas…). Ce processus de transfert s'enchaîne rapidement jusqu'à transférer le mouvement aux molécules d'eau dans le récipient, à partir de leur première couche qui est en contact direct avec le métal.

Si nous gardons la flamme allumée, l'eau va rapidement bouillir et après un certain temps nous pourrons faire cuire les pâtes. Si le fond de la marmite était parfaitement isolant, nous devrions nous résigner à manger les pâtes crues ou à mourir de faim : l'eau resterait tristement froide.

Ce à quoi on ne peut échapper : les Principes

Le premier principe de la thermodynamique stipule que l'énergie d'un système isolé, qui ne peut pas échanger de la matière ou de l'énergie avec ce qui l'entoure, est toujours la même, elle ne change pas. Ainsi l'énergie du système isolé par excellence, l'Univers, est constante.

Le premier principe est objectivement une bonne nouvelle, quoiqu'un peu effrayant pour les personnes essayant de garder la ligne: l'énergie de la nourriture qu'on pas dépense pas en exercice physique ou mental, s'accumule sous forme de graisse.

L'énergie accumulée dans le réservoir de la voiture qui vous emmène en vacances sert à accomplir un travail, et quand on arrive à la réserve on croit inconsciemment que le moteur a consommé toute l'énergie qui était dans le réservoir. Ce n'est pas le cas.

En montant le col de l'Iseran, par exemple, l'énergie achetée à la station d'essence a été transformée en partie en énergie potentielle gravitationnelle (la voiture nous a monté à une altitude importante), en partie en chaleur émise par le pot d'échappement, en partie sous forme de chaleur de friction avec l'asphalte, avec l'air et entre les pièces à l'intérieur du moteur.

Le combustible liquide est transformé en gaz, principalement en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone (CO_2, plus communément connu sous le nom d'anhydride carbonique), et se retrouve dans l'atmosphère. Dans cette transformation le volume initial de carburant augmente d'un facteur 2000, parce que le gaz produit est beaucoup moins dense que l'essence d'origine. Mais parce que le gaz est invisible, nous ne culpabilisons pas trop. En bref, nous ne voyons rien, mais l'énergie n'est pas perdue pour tout le monde. La discrétion avec laquelle l'essence disparaît est vraiment incroyable.

* Comme nous le verrons plus loin, une partie minuscule de la masse de carburant disparaît vraiment, transformées dans l'énergie libérée par la combustion. Mais dans les réactions chimiques la variation de masse est infime et peut être négligée.

Le deuxième principe est l'une des lois de la nature les plus fascinantes et ses conséquences sont des plus vastes. Il peut être énoncé de plusieurs manières, mais la plus intuitive est probablement la suivante : dans un système isolé la chaleur se déplace toujours d'un corps à une température supérieure vers un corps à une température inférieure.

Il est important de noter que le deuxième principe affirme que la chaleur ne peut pas passer d'un corps froid à un corps chaud, c'est pourtant ce que fait le réfrigérateur. Mais le réfrigérateur n'est pas un système isolé. Le second principe affirme que si nous voulons que la chaleur s'écoule dans le sens opposé à sa tendance naturelle, nous devons fournir de l'énergie au système. Le réfrigérateur ne fonctionne que s'il est connecté à la prise de courant.

Le deuxième principe conduit subtilement à la notion qu'il existe une hiérarchie entre les différentes formes d'énergie. En clair, chaque fois fois qu'on produit du travail, on consomme de l'énergie et on dissipe de la chaleur.

L'apparition d'énergie thermique est inévitable dans tout processus de conversion de l'énergie : le moteur de la voiture et le radiateur d'un réfrigérateur, notre corps chaud qui produit de l'énergie mécanique et sans tours de refroidissement, une centrale électrique fondrait. Toutes les énergies peuvent être transformées en chaleur, c'est à dire en énergie thermique, mais l'inverse n'est pas possible. Chaque fois que l'on convertit une forme « noble » d'énergie en une autre, par

exemple, de l'énergie électrique ou mécanique, toute l'énergie initiale disponible ne peut pas être utilisée pour effectuer un travail utile. Inévitablement, une part est dégradée à jamais en chaleur.

Dans la plupart des cas, cette taxe « thermique » est dissipée dans le milieu, principalement dans l'atmosphère et les eaux de surface, ce qui explique que les centrales électriques soient construites au bord des mers, des lacs, et des fleuves. Même quand elle est construite selon les règles de l'art, par principe une centrale ne peut pas convertir plus de la moitié de l'énergie chimique du combustible qu'elle utilise en énergie électrique, la plupart de cette énergie est transformée en chaleur qui est déversée tel un déchet dans les environs immédiats de l'usine.

Malheureusement, aucun navire en transit sur le Rhône ne peut prélever dans le fleuve la chaleur dissipée par les nombreuses centrales qui bordent ses rives pour faire fonctionner son moteur. Le blocage vient de ce que l'énergie thermique qui a été dissipée par les centrales électriques a une « valeur » beaucoup plus faible que l'énergie chimique du carburant dont elle est issue ce qui fait que son utilisation à des fins utiles est limitée.

Il en va de même pour les voitures : une bonne partie de l'énergie compacte et précieuse contenue dans le réservoir est dissipée en une multitude de flux de chaleur inutiles, dont un bon exemple est constitué par les différentes frictions que nous avons déjà mentionnées. Dans ce processus, l'énergie de l'univers est conservée, comme l'impose le premier principe, mais perd de sa valeur comme le dit de second. Qui est encore convaincu aujourd'hui qu'il pourrait construire une machine à mouvement perpétuel connait peut-être le premier principe, mais semble ignorer le deuxième.

Le deuxième principe, révèle, plus généralement, une asymétrie profonde de la nature : le désordre est obtenue en un instant, tandis que l'ordre coûte du travail, du temps et des efforts.

Les systèmes naturels tendent inexorablement au désordre. L'univers est ainsi, il faut se faire une raison. L'énergie a une tendance spontanée et inexorable à se transformer dans une forme plus désordonnée, la chaleur est une des expressions de la tendance générale de l'univers au chaos, qui est exprimé scientifiquement par une fonction appelée entropie. L'énergie de l'univers est constante, mais son entropie augmente.

Pour illustrer ce concept, nous pouvons imaginer mettre dans une boîte une couche d'une centaine de billes rouges, puis une couche de cent billes bleues, puis à nouveau cent billes vertes. Si nous nous secouons maintenant vigoureusement la boîte, les billes se mélangent. Lorsque cet état est atteint, même si l'on continue de secouer la boîte pendant des millions d'années, il est hautement improbable (on pourrait dire impossible) de retrouver la configuration ordonnée d'origine. À bien y penser, notre vie quotidienne est une démonstration éclatante de la puissance implacable du deuxième principe : Il ne nous faut que quelques minutes pour mettre notre chambre en désordre, tandis que la ranger peut prendre des heures de travail acharné.

À ce stade, vous êtes tenté de penser que les êtres vivants n'obéissent pas au deuxième principe. Malheureusement, ce n'est qu'une illusion car les êtres vivants ne sont pas des systèmes isolés et la tendance au désordre (l'entropie, en fait) doit être mesurée par rapport à tout son environnement.

L'ordre et l'extraordinaire complexité de toutes les formes de vie, même les plus simples, sont contrebalancés par la croissance du désordre dans leur environnement qui est engendré par la dégradation progressive du Soleil, dont nous ne sommes pas isolés. Les êtres vivants, pour survivre et rester structurés et ordonnés, doivent sans cesse produire des déchets, qui sont une forme de désordre, qui se déversent dans l'environnement. les premiers d'entre eux sont les déchets … physiologiques.

Le Premier et le Deuxième principe de la thermodynamique devraient faire parti de notre bagage culturel de base au même titre que la peinture, la Constitution ou que les comédies de Molière. Malheureusement il n'en est rien et des journalistes sont convaincus qu'un incinérateur qui détruit les déchets produit de l'énergie, des économistes et des syndicalistes pensent que la croissance économique peut se poursuivre à jamais, des élus verts parlent de « charbon propre » et des scientifiques nient le réchauffement climatique.

Peut-être que chez eux ils n'ont pas besoin de brancher le réfrigérateur, qui sait ?

$E=mc^2$

Tout le monde connaît cette équation, elle est une sorte d'icône du XXe siècle. On la porte sur des T-shirts au même titre que le nom d'un groupe de rock ou que la photo de Che Guevara. Cette équation permet notamment de donner une définition de l'énergie compréhensible par tous, même si la réalité est un peu difficile à accepter.

$E = mc^2$ signifie que la masse et l'énergie sont une même chose sous des formes différentes. Comme la glace fond et se transforme en eau, en changeant totalement d'apparence, la masse est une forme d '« énergie surgelée » qui peut être convertie en des formes familières de l'énergie : thermique, cinétique, et autre.

Dans l'équation, la lettre c est la vitesse de la lumière dans le vide, égale à 300 000 kilomètres par seconde. Élevée au carré, elle a une valeur gigantesque. Par conséquent, les valeurs à gauche et à droite de l'équation d'Einstein étant égales on doit pouvoir obtenir de grandes quantités d'énergie à partir de très faibles masses.

Chaque fois qu'on produit de l'énergie, de tout type, une masse plus ou moins grande « disparaît ». Cette « dématérialisation » nous rappelle les films improbables de science-fiction et nous rend sceptique. Mais c'est ainsi.

L'énergie consommée en un mois par une immense mégapole moderne comme

Londres est comparable à l'énergie « gelée » dans la masse de ce livre. Les destructions effroyables d'Hiroshima et de Nagasaki ont été obtenues avec moins de 30 grammes de matière transformée en énergie.

La fission nucléaire transforme la matière en énergie de manière très efficace, mais, comme nous le verrons, en laissant des déchets très dangereux. Un kilogramme d'uranium dans une centrale nucléaire peut produire une énergie de 50 000 kilowatts-heure, tandis qu'un kilo de charbon dans une centrale thermique ne produit que 3 kilowatts-heure. Dans les deux cas, l'équation d'Einstein est respectée. La quantité de matière qui « s'évapore » en énergie est beaucoup plus grande pour l'uranium que pour le charbon.

Depuis près de cinq milliards d'années, par des processus de fusion nucléaire à des températures supérieures à 10 millions de degrés, le soleil transforme chaque seconde 4,4 milliards de tonnes d'hydrogène en énergie électromagnétique. Une minuscule fraction de ce flux sans fin d'énergie éclaire nos jours. Bien sûr, on peut également convertir l'énergie en masse, et cela a été vérifié par des expériences très compliquées dans des accélérateurs. En concentrant dans un petit volume d'espace d'énormes quantités d'énergie, il est possible de « créer » de nouvelles particules de matière.

Du kilowatt au baril

Les unités de mesure sont le désespoir de nombreux étudiants. Il en existe plusieurs couramment utilisées certaines sont compréhensible par tous, d'autres sont plus difficiles à assimiler. Le système international d'unités (SI) définit l'unité de sept grandeurs physiques fondamentales : la longueur est mesurée en mètres (m), le temps en secondes (s), la masse en kilogrammes (kg), la température en Kelvin (K), la quantité de matière en moles (ml), le courant électrique en ampères (A), l'intensité lumineuse en candelas (cd).

Toutes les autres grandeurs physiques, aussi étrange que cela puisse sembler, sont une combinaison de ces sept là. Certains professeurs de sciences ressentent une volupté sadique à voir leurs élèves, choqués par le fait que la résistance électrique a quelque chose à voir avec les kilogrammes, ou la capacité calorifique avec les mètres. Beaucoup de jeunes gens n'ont-ils pas abandonner à jamais les études scientifiques pour cette raison ?

Comme nous l'avions anticipé, l'énergie n'est pas un concept physique primaire. Il peut sembler étrange que l'intensité du courant électrique ou de lumière soient hiérarchiquement supérieures à l'énergie, mais il en est ainsi.

Nous avons déjà dit que le travail peut être exprimé comme une force multipliée par une longueur. En termes de dimensions physiques, signalées par des parenthèses droites :

[travail] = [force] X [longueur].

La force est à son tour une grandeur qui peut être exprimée comme une masse sur

une distance divisée par le temps au carré ** :

[force] = [masse] X [longueur]/ [temps] ^{2}

** En fait, la célèbre loi de Newton, F = ma, montre qu'une force est égale à la masse multipliée par une accélération, qui est elle-même une variation de vitesse (longueur divisée par le temps) par unité de temps.

Donc, le travail - à savoir l'énergie, qui en est la quantification - a les dimensions physiques suivantes :

[travail] = [énergie] = [masse] X [longueur]^2 / [temps]^2.

Mais personne ne serait heureux d'utiliser une unité tordue comme les kg.m^2 / s^2 pour exprimer une quantité d'énergie. Heureusement pour les grandeurs dérivées de ces principes de nouvelles unités ont été adoptées, souvent désignées par des noms de célèbres scientifiques du passé.

Dans le cas de l'énergie, il a été décidé que l'unité kg.m^2 / s^2 est tout simplement appelée « Joule » et elle est représentée par le symbole J.

Le Watt (symbole W) est l'unité de mesure de la puissance : 1 Watt est égal à 1J d irisé par 1 seconde (J / s). Le choix d'honorer Joule et Watt était certainement approprié, compte tenu de la contribution de ces deux scientifiques britanniques à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'énergie.

Malheureusement, le joule est une unité qui a une très petite valeur. Un simple mulot consomme environ 50 000 J par jour pour survivre. Le réservoir d'une voiture de cylindrée moyenne contient plus d'un milliard de joules d'énergie.

Dans la pratique, on utilise une unité de mesure de l'énergie bien plus grande. Parmi les plus courantes on trouve les calories utilisées pour mesurer la chaleur et le kilowatt-heure pour l'électricité. Pour établir les bilans énergétiques on utilise dans le monde d'autres unités de mesure qui ne sont pas strictement liées à l'énergie grandeur physique, comme le montre le tableau 2.

Table 2 : Quelques unités de mesure courantes de l'énergie

Unité	**symbole**	**valeur en Joules**
Calorie	cal	4,19 J
British thermal unit	BTU	1,05.10^3 J
kilowattheure	kWh	3,60.10^6 J

baril d'équivalent pétrole	bep	$6,12.10^9$ J
tonne d'équivalent pétrole	tep	$4,19.10^{10}$ J

Il est d'usage courant d'utiliser comme unité la masse ou le volume de combustibles fossiles, que l'on associe à leur contenu énergétique. La plus utilisé est le tep (tonne d'équivalent pétrole, en anglais, te, ton of oil équivalent), qui représente l'énergie thermique délivrée par la combustion complète d'une tonne de pétrole, ou de ses sous-multiples kgep (kg équivalent pétrole). On utilise également le baril équivalent bep (boe en anglais, barrel of oil équivalent) qui correspond à l'énergie produite par la combustion de 159 litres (soit environ 130 kg) de pétrole.

De la liaison chimique au tsunami

La quantité d'énergie impliquée dans la grande variétée de processus naturels et artificiels existants est très variable. Par exemple, le saut d'une puce prend un cent millionièmes d'un Joule, alors qu'une tempête tropicale développe une énergie de plusieurs dizaines de milliers de milliards de Joules. Si donc nous voulons maintenir la même unité de mesure pour tout phénomène impliquant de l'énergie, pour éviter la multiplication des zéros, il faut utiliser les préfixes pour les multiples et sous-multiples, indiqués dans le tableau 3.

Table 3. : Symboles des multiples et sous-multiples

symbole	**prefixe**	**facteur**
a	atto-	10^{-18}
f	femto-	10^{-15}
p	pico-	10^{-12}
n	nano-	10^{-9}
μ	micro-	10^{-6}
m	milli-	10^{-3}
k	kilo-	10^{3}
M	mega-	10^{6}
G	giga-	10^{9}
T	tera-	10^{12}
P	peta-	10^{15}
E	exa-	10^{18}

Faisons maintenant un court voyage sur l'échelle des énergies à partir de deux entités infinitésimales qui peuvent sembler insignifiantes, mais qui constituent en réalité le trésor caché de l'énergie fossile. Nous invoquons ici les liaisons chimiques entre deux atomes de carbone (symbolisée C-C) et entre un atome de carbone et un atome d'hydrogène (symbolisée C-H). Chacune de ces liaisons chimiques contient environ 0,7 milliardième d'un milliardième de joule, ou 0,7 aJ (attojoule).

Ce sont ces très petites valeurs d'énergie qui sous-tendent la civilisation industrielle, l'ère du numérique, la mondialisation de l'économie. En un mot, la modernité. Malgré leur très petite valeur énergétique ces liaisons chimiques, qui dictent littéralement le prix de l'argent économique, sont à l'origine de conflits meurtriers pour s'en assurer le contrôle !

L'énergie nécessaire pour enfoncer une touche sur votre ordinateur est de 20 millièmes de Joule (20 mJ). La ration alimentaire journalière d'un adulte bien nourri, est en moyenne de 10 millions de Joules (10 MJ). Un kilogramme de charbon de bonne qualité contient environ 30 millions de Joules d'énergie, soit 30 mégaJoules (30 MJ).

La consommation mondiale annuelle d'énergie primaire est en valeur stationnaire d'environ 400 milliards de milliards de Joules, soit 400 exajoules (400 EJ), dont les carburants fossiles représentent environ 300 EJ.

La plus grosse bombe à hydrogène testée jusqu'ici a développé 240 million de milliard de Joules (240 PJ, 240 pétajoules), une énergie trois mille fois supérieure à la bombe lâchée sur Hiroshima (84 mille milliard de joules, 84 TJ, térajoules).

Chaque année, la Terre reçoit du Soleil 5,5 millions de milliards de milliards de Joules (5 500 000 EJ) d'énergie lumineuse, dont environ 2000 EJ sont convertis en biomasse par la photosynthèse.

Il est également intéressant d'examiner brièvement la puissance, c'est à dire la quantité d'énergie par unité de temps, de certains phénomènes. Une bougie allumée développe seulement 5 Watts (5 W), une ampoule à incandescence 60 W, une machine à laver qui fonctionne à 60 degrés atteint environ 800 W, le moteur d'une Ferrari de Formule 1, lui est à 550 mille W (550 kW). Les quatre moteurs d'un Boeing 747 transcontinental produisent 80 millions de watts (80 MW) pendant le décollage. Un violent orage développe 100 milliards de watts (100 GW).

La vitesse moyenne de la consommation mondiale d'énergie s'élève à environ 13 mille milliards de Watts (13 TW), une valeur qui est obtenue en divisant la consommation annuelle mondiale d'énergie (400 EJ) par le nombre de secondes dans une année qui est d'environ 31,5 million.

Une éruption volcanique libère 100 mille milliards de Watts (100 TW). Un séisme de magnitude 8 sur l'échelle de Richter produit 1,6 million de milliards de W (1,6 PW), et peut créer d'énormes vagues océaniques, les tsunami, qui peuvent semer la mort et la destruction lors de leur arrivée sur la terre ferme.

Ces chiffres donnent une idée approximative de l'immense pouvoir de la nature et du respect qu'elle mériterait de la part de l'humanité.

CHAPITRE 2

Hier et aujourd'hui

La lutte pour l'existence est une lutte de conquête de l'énergie
Ludwig Boltzmann

Pour pointer du doigt le problème de l'énergie il faut considérer la Terre comme un gigantesque astronef qui se déplace dans l'immensité de l'univers. Bien que voyageant à une vitesse de 29 kilomètres par seconde elle ne consomme pas ses ressources énergétiques pour se déplacer. Mais par contre, il faut beaucoup d'énergie pour entretenir les nombreux passagers qu'elle transporte : 6,7 milliards de personnes aujourd'hui qui passeront à environ 8 milliards dans 20 ans. Chaque année, la population mondiale augmentera de 75 millions d'unités, principalement dans les pays en développement : 32 bébés naissent chaque minute en Inde et 24 en Chine.

Au cours des 150 dernières années, notre vie a profondément changé, pour le meilleur ou pour le pire, grâce à la large disponibilité de l'énergie associée à l'exploitation des combustibles fossiles. Examinons brièvement les aspects saillants de ce changement.

L'énergie des esclaves

Sans les esclaves, de grands projets comme les pyramides, la Grande Muraille de Chine ou le Colisée n'auraient pas pu être menées à bien. Les esclaves étaient pour la plupart des prisonniers de guerre, mais aussi des condamnés ou des débiteurs insolvables. Pendant des millénaires l'humanité a utilisé la seule énergie à sa disposition immédiate : le travail musculaire des hommes et des animaux, le vent (moulins et bateaux), les voies d'eau (navigation fluviale et les moulins à eau) et la biomasse (bois). Dans les grandes civilisations du passé - égyptienne, chinoise, grecque, romaine - une des grandes source d'énergie était fournie par des esclaves.

Plus récemment, l'esclavage a été pratiqué à grande échelle, particulièrement en Amérique, où pendant des siècles des millions d'Africains ont été déportés pour effectuer les travaux les plus durs en agriculture. Bien que l'esclavage ait été officiellement aboli, il reste un problème dans le monde et particulièrement celui des enfants et des femmes.

Un homme en bonne santé peut produire environ 800 Watts (W) pendant une courte période, comme monter une volée d'escalier, mais en activité permanente sur plusieurs heures, il est incapable de développer une puissance supérieure à environ 50 W. Donc, nous pouvons estimer que les 12 heures de travail par jour d'un esclave correspondent à une quantité d'énergie de 50 x12 = 600 Watt-heure (Wh).

Comparons maintenant cette « énergie esclave » avec la consommation électrique

journalière de nos appareils ménagers.

Une radio-enregistreur de CD a une puissance d'environ 25 W. Cela signifie que son fonctionnement consomme une quantité d'énergie qui est environ la moitié de celle produite par le travail d'un esclave.

Pour regarder un match de football à la télévision avec un téléviseur LCD de 30 pouces on utilise une puissance électrique de 100 W égale à celle produite par deux esclaves de l'énergie (Figure 1). Alimenter un ordinateur personnel, nécessite une puissance d'environ 150 W et donc l'emploi en continu de trois esclaves.

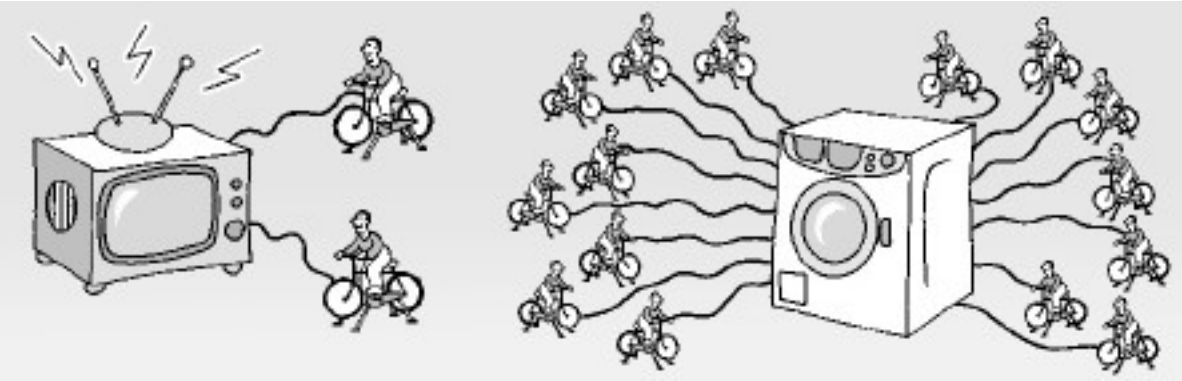


Figure 1. La puissance électrique requise pour faire fonctionner un poste de télévision est équivalente à celle développée par le travail de deux personnes. Pour une machine à laver le travail de quinze personnes est requis.

Comme le montre encore la Figure 1, faire une lessive avec une machine à laver de classe efficace, dont la consommation est d'environ 800 Wh par lavage à 60°C pendant une heure, équivaut à utiliser le travail de quinze esclaves .

Dix minutes d'utilisation d'un sèche-cheveux d'une puissance de 1,2 kW consomme une quantité d'énergie de 20 Wh égale à celle produite par une « puissance esclave » de près d'une demi-heure. Un chauffage électrique de petite taille (2,5 kW de puissance) est équivalent à l'utilisation de l'énergie générée par le travail de 50 esclaves.

Un simple moteur de tondeuse à gazon (pas de tracteur !) a une puissance de 3,5 kW. En une heure de travail de cet outil consomme une énergie égale à celle produite par six esclaves ayant travaillé pendant 12 heures.

Le moteur d'une voiture de cylindrée moyenne, d'une puissance d'environ 80 kW à sa vitesse de croisière, consomme pour rouler, le travail de 1600 esclaves. Il est clair que même l'empereur César Auguste, ne pouvait pas se permettre le luxe de la disponibilité instantanée d'une telle masse d'individus à travers le geste simple qui consiste à tourner une clé dans un tableau de bord !

L'une des machines les plus puissantes disponibles aujourd'hui, transportant des passagers, l'AirBus A380, développe au décollage une puissance de 80 MW qui équivalent à 1 millions 600 mille « esclaves énergétiques ». En d'autres termes :

chaque fois qu'un AirBus A380 décolle de Roissy Charles de Gaulle il développe, en brisant les liaisons chimiques de son combustible, la puissance musculaire que devraient développer tous les habitants d'une région comme l'Alsace !

Enfin une tranche de centrale électrique de 800 MW produit l'équivalent de la puissance musculaire de 16 million de personnes soit un peu moins du quart de la population française !

Du charbon ...au charbon ?

Le bois a toujours été utilisé, pour répondre aux besoins énergétiques de base tels que la cuisine et le chauffage, en tant que matière première pour la construction de maisons, de bateaux et d'artefacts de toutes sortes. En 1891, aux États-Unis, dont la population était alors de 31 millions d'habitants, 90% de l'énergie était obtenue à partir du bois, mais celui-ci commençait à manquer. Sur le continent européen lui-même la déforestation s'est poursuivie pendant des siècles, jusqu'à ce qu'elle devienne insupportable*.

* Aujourd'hui, la déforestation se poursuit dans d'autres régions du monde : on estime que chaque année, quelques 160 000 km2 de forêt sont détruits, une surface qui représente à peu près un tiers de la superficie de la France. Les pays européens sont parmi les plus grands importateurs de bois.

Entre les XVIe et XVIIe siècles ont a commencé, en Angleterre, à exploiter le charbon, une source d'énergie plus difficile à exploiter, mais beaucoup plus abondante. On le connaissait déjà depuis longtemps, mais tant que les ressources forestières étaient abondantes, elles restaient plus attrayantes.

À poids égal, cependant, le charbon est un combustible beaucoup plus puissant que le bois et il a permis d'obtenir une quantité beaucoup plus élevée de travail utile. La demande de charbon n'a cessé de croître et cette consommation a fait obligation de creuser des mines de plus en plus profondes : au début du XIXe siècle il existait déjà des mines à 300 mètres de profondeur.

Il faut reconnaître que les conditions de vie des mineurs, qui étaient quelques fois des enfants, furent dans de nombreux cas insupportables. Le coût humain de l'activité minière fut énorme (ce qui est encore le cas dans certains pays comme la Chine, par exemple). Au cours des siècles l'humanité a donc subit les dégâts associés aux combustibles fossiles et pas seulement bénéficié des avantages qui leurs sont associés.

Avec une disponibilité croissante de charbon, la disponibilité des métaux a elle aussi commencé à augmenter, par la mise au point du processus de fusion dans des fours à haute température. C'est l'abondance de métaux qui a permis que commence l'ère des machines.

L'innovation la plus importante faite à partir de l'abondance du charbon est la machine à vapeur, brevetée en Angleterre par James Watt en 1769. Elle convertit

l'énergie chimique du charbon en énergie thermique, puis en énergie mécanique. La puissance musculaire humaine et animale et l'énergie des moulins à vent ou à eau, utilisés depuis des millénaires, ont pu alors être facilement remplacés par des machines puissantes et ce fut le début de la révolution industrielle.

À la fin du XIXe siècle l'utilisation du charbon comme combustible avait dépassé celle du bois, des déchets industriels et agricoles. L'Angleterre et les États-Unis étaient les pays ayant la plus forte production de charbon et étaient donc les plus avancés dans la transition de l'artisanat traditionnel à la production industrielle.

La machine à vapeur de Watt, plus avancée que la machine de Newcomen mais encore inefficace, a été progressivement perfectionnée et à la fin du XIXe siècle, les chaudières à vapeur étaient trente fois plus puissantes, et dix fois plus efficaces que les modèles du début du siècle, même si elle restaient trop lourdes pour une utilisation dans les transports routiers. En 1900, le charbon était la source de 95% de l'énergie commerciale. Alors commença l'ère du pétrole. Les premiers à extraire le pétrole des entrailles de la terre depuis des temps immémoriaux, étaient probablement les Chinois. Cependant l'extraction industrielle de ce que l'on a appelé l'« or noir » a commencé aux États-Unis en 1859 à Oil Creek en Pennsylvanie. Dans la seconde moitié du XIXe siècle l'extraction du pétrole se développa dans d'autres régions des États-Unis, au Texas, en Californie, mais aussi en Roumanie, sur la mer Caspienne et en Indonésie.

Dans la première décennie du XXe siècle ont commencé les forages au Mexique, en Iran et au Venezuela. Le premier puits de pétrole en Arabie saoudite n'a commencé à produire qu'en 1938. Après la Seconde Guerre mondiale a commencé à se développer de manière cohérente l'exploitation des gisements d'un autre combustible, le gaz naturel, dont l'impact moindre sur l'environnement a fait un substitut viable pour le charbon et le pétrole dans de nombreuses applications.

L'extraction du pétrole et l'invention du moteur à combustion interne ont initié un fort développement des transports. La démarcation entre l'ère du charbon et celle du pétrole peut être datée de 1911, quand l'Angleterre a décidé de convertir sa flotte du charbon au pétrole.

Contrairement à l'ère de bois, qui a pris fin par manque de matière première, l'ère du charbon a commencé à décliner non par manque de charbon, mais parce qu'est apparue une possibilité alternative plus attractive. En réalité, l'ère du charbon, en particulier dans les procédés industriels, n'est absolument pas terminée puisqu'elle fournit encore environ 25% de l'énergie primaire consommée, qui est principalement convertie en électricité.

En raison de la pénurie de pétrole à venir, ce pourcentage va probablement encore s'accroître. En Chine, où il y a de grandes réserves, en 2006 on extrayait 2620 millions de tonnes de charbon et il est prévu que la production augmente de 4% par an, au moins, jusqu'en 2030, doublant ainsi le niveau d'extraction actuel.

L'énergie cachée

De l'énergie est cachée dans tout ce qui nous entoure. L'analyse du coût énergétique d'un produit est une opération complexe qui repose souvent sur des paramètres douteux. Les valeurs indiquées ci-dessous sont des estimations donc une première approximation, qui servent à clarifier le concept fondamental que pour faire quelque chose d'utile qui comporte aussi un aspect néfaste, il faut beaucoup d'énergie.

On estime que produire une tonne (t) de feuilles de papier nécessite une quantité d'énergie égale à 0,8 tep (tonne équivalent pétrole), et pour les plastiques 1,5-3,0 tep / t, pour d'aluminium environ 5 tep / t ; pour le titane, largement utilisé dans l'industrie aérospatiale, environ 20 tep / t.

Pour construire une voiture on utilise une moyenne de 3 tep / t. Donc, nous pouvons estimer que, avant même d'avoir commencé à circuler, une voiture a déjà consommé environ 25% de l'énergie totale qu'elle consommera avant d'être mise au rebut.

Pour produire un ordinateur une quantité d'énergie équivalente à celle fournie par environ 270 kg de pétrole est nécessaire. Cela signifie qu'avant même il ait servi l'ordinateur a consommé une quantité d'énergie d'environ trois fois celle qu'il utilisera toute sa vie. Mettre au rebut un appareil ou un objet revient à gaspiller l'énergie qui a servi à le produire.

Considérons maintenant le coût énergétique de l'énergie. L'extraction du pétrole provenant des riches puits de la côte du Moyen-Orient coûte 5% de l'énergie produite, mais pour produire du pétrole à partir des sables bitumineux du Canada la facture peut aller jusqu'à 35%. Le transport de l'or noir par les itinéraires de transport le long des côtes océaniques coûte l'équivalent de 1% de l'énergie transportée.

De même le transport de gaz par méthaniers coute 10 à 15% de l'énergie embarquée, car le gaz doit d'abord être liquéfié à une température de -162 ° C, puis maintenu dans cet état pendant plusieurs jours avant d'arriver dans une usine de re-gazéification. De là, il entre dans le réseau de gazoducs, où il voyage au moyen d'installations spéciales de pompage situées le long de sa route tous les 100 km environ. Le transport par pipelines présente un coût énergétique trois fois plus important pour le gaz que pour le pétrole.

Extraire du charbon à faible teneur provenant de mines souterraines peut coûter 20% de son contenu énergétique. De l'énergie supplémentaire est nécessaire, bien sûr, pour son conditionnement, son transport et, éventuellement sa conversion en d'autres formes d'énergie. La production d'électricité dans une centrale à charbon conventionnelle a une efficacité limitée qui ne récupère que 30 à 40% de l'énergie primaire. De plus de l'énergie doit être dépensée pour la construction des centrales électriques, des réseaux de transmission et des pertes supplémentaires se produisent lors de la transmission de l'électricité sur de longues distances.

Dans le cas de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et d'autres technologies

renouvelables, le coût énergétique du transport de la source d'énergie est nul, mais il reste l'investissement énergétique nécessaire à la fabrication des dispositifs eux-mêmes, à l'instar des technologies classiques. Il est estimé que la quantité d'énergie utilisée pour construire des panneaux photovoltaïques est récupérée en 1 à 3 ans d'opération. Comme nous le verrons, le temps de retour sur investissement énergétique est plus élevé que celui calculé pour le parc éolien, mais inférieur à celui d'une centrale nucléaire typique.

De Faraday à l'effondrement de réseau

Le 17 Octobre 1831, le scientifique britannique Michael Faraday a montré qu'il est possible de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice-versa, en exploitant le phénomène de l'induction électromagnétique. Selon la légende (peut-être apocryphe) Le Premier ministre britannique lors d'une visite à son laboratoire, a demandé à quoi allait servir la « substance exotique » appelée électricité, et Faraday aurait répondu : « Ne vous inquiétez pas, Monsieur, un jour elle s'imposera ».

La capacité de générer un mouvement mécanique à partir de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz, et la découverte de Faraday, ont rendu possible la production à grande échelle d'électricité, ce qui a également été facilité par l'élaboration d'un nouveau type de moteur : la turbine à vapeur. La première centrale électrique est entrée en service à Londres le 12 Janvier 1882 et le développement de l'électricité est dû en grande partie au génie, à l'inventivité et à la capacité entrepreneuriale d'une poignée d'ingénieurs et de scientifiques tels, par exemple Thomas Alva Edison, Nikola Tesla et George Westinghouse.

L'électricité, tout en étant d'une importance fondamentale pour de nombreux processus industriels et pour le rail, a changé le visage de la ville et le mode de vie des citoyens des pays riches.

Elle entre dans nos maisons de façon continue, précise, propre et calme et nous permet d'éteindre les lumières et de contrôler le fonctionnement du frigo, du lave-linge, de la télévision, de la radio, du téléphone, du climatiseur, de l'ordinateur et des dizaines d'autres appareils qui rendent notre vie moins pénible et plus agréable. Tout ceci est possible grâce à l'existence de réseaux de distribution qui sont les infrastructures les plus vastes et les plus complexes jamais construites par l'homme. Pour nous, Européens, le réseau s'étend de l'Atlantique à l'Oural et du cercle polaire arctique à l'Afrique du Nord.

Bien que la plupart d'entre nous ne s'en rendent pas compte, mais c'est grâce à l'électricité que nous ne sommes pas obligés de sortir tous les jours pour acheter de la nourriture, que nous pouvons laver le linge sans effort, voir ce qui se passe dans le monde, écouter de la musique d'un système stéréo, écrire un texte sans employer le stylo et le papier et faire avec aisance toutes ces autres choses qui sont entrées dans nos habitudes quotidiennes.

Notre dépendance à l'électricité a atteint un niveau pathologique : sans elle nous ne pouvons plus avoir d'activité. C'est ce qu'on montré tous les grands

effondrements de réseaux qui ont eu lieu depuis la fin du XXe siècle en Amérique du Nord et en Europe. Dans le même temps, nous ne devons pas oublier que 1,6 milliards de personnes n'ont pas accès aux réseaux d'électricité. Comme nous allons le voir, le meilleur espoir pour elles d'accéder à l'électricité est la diffusion des technologies renouvelables à petite échelle.

Du travail musculaire aux avions à réaction

La capacité de voyage et de transport de marchandises a été fondée jusqu'au XIXe siècle sur le travail musculaire des hommes et des animaux d'une part et sur la possibilité d'exploiter le vent en mer et sur terre et les courants des rivières.

Les animaux les plus utilisés ont été les chevaux, les bœufs, les dromadaires, les chameaux et les éléphants. En Amérique, les chiens et les lamas ont été aussi utilisés comme animaux de trait ou de bât. Les charriots des Romains, tirés par des bœufs pouvaient transporter jusqu'à 500 kg de marchandises sur une distance quotidienne de 15 à 20 km. Les caravanes de chameaux, qui transportaient le sel à travers le désert du Ténéré au Niger, de Bilma à Agadez (610 km), parcouraient 40 km par jour avec une charge de près de 100 kg par tête. Ces caravanes ont désormais été supplantées par les camions, chacun avec une capacité de charge égale à celle de 250 chameaux.

La première percée dans le monde du transport a été à l'invention par Cugnot d'une chaudière à vapeur et d'un moteur à dépression suffisamment légers pour pouvoir être embarqués sur un châssis fait de lourds madriers. L'amélioration des moteurs à vapeur et la réduction de taille des chaudières a permis tout d'abord de motoriser les bateaux fluviaux au début du XIXe siècle. Mais déjà en 1833, l'usage du charbon comme carburant a permis la première traversée de l'Atlantique par un paquebot, sur le parcours Québec-Londres.

Puis le transport ferroviaire a commencé à se développer, bénéficiant des constantes améliorations des chaudières et des moteurs. Le premier chemin de fer public a commencé à fonctionner en Angleterre, entre Liverpool et Manchester en 1830. Le 3 octobre 1839 Ferdinand II a inauguré la ligne Naples-Portici, le premier chemin de fer de la péninsule italienne. En 1904, le Trans-sibérien fut mis en service, qui reste, encore aujourd'hui, la plus longue voie ferrée dans le monde, reliant Moscou à la Sibérie et l'Extrême-Orient sur un parcours de plus de 9000 km. Aujourd'hui, la plupart des trains utilisent l'électricité, et dans de nombreux pays, il existe des trains à grande vitesse qui roulent à plus de 300 km / h.

Malgré les énormes progrès réalisés dans la technologie des moteurs à vapeur, ils n'ont pas réussit à dominer le secteur du transport parce que, vers le milieu du XIXe siècle, est apparu un concurrent redoutable du charbon, un combustible beaucoup plus souple, plus facile à transporter, moins polluant et plus puissant : le pétrole.

La disponibilité du pétrole a donné une impulsion au développement des moteurs à combustion interne. Grâce à cette technologie il n'était plus nécessaire de produire de la vapeur comme générateur de force mécanique. Un combustible

liquide ou gazeux peut en effet produire un travail directement dans la chambre de combustion d'un moteur où il brûle sans l'aide de la vapeur comme intermédiaire. La suppression d'une étape dans la production d'énergie mécanique rend les moteurs à combustion interne intrinsèquement plus efficaces.

Les brevets dans ce domaine ont été nombreux : moteur quatre temps (Otto, 1876), moteur à cylindre vertical (Daimler, 1885), moteur diesel (Diesel, 1892). En 1885, Karl Benz construit en Allemagne le premier véhicule à quatre roues à moteur à combustion interne, ouvrant la voie de la production artisanale d'automobiles.

À la fin du siècle, une industrie automobile a commencé à se mettre en place. La société FIAT, par exemple, est née en 1899. Dans ces années, le transport dans la ville est toujours assuré par les chevaux : à Londres en 1901, on en comptait environ 300 000. La production industrielle de voitures sur une grande échelle a démarré aux États-Unis sur l'initiative d'un jeune entrepreneur du Michigan, Henry Ford. Il a mis sur le marché la première voiture de série d'un coût abordable pour un grand nombre d'acheteurs potentiels, la fameuse Ford T. En un an, les vendeurs de chevaux qui avaient accueilli avec un sourire l'arrivée des premières voitures ont dû changer de métier !

Le matin du 17 décembre 1903, sur les côtes de Caroline du Nord, pour la première fois une machine inventée par l'homme a volé dans les airs, couvrant une distance de plusieurs dizaines de mètres. Orville et Wilbur Wright, deux mécaniciens ingénieux de l'Ohio, avaient réussi à combler un rêve qui avait fasciné les scientifiques et les artistes pendant des millénaires.

Le développement de l'aviation est l'une des plus grandes avancées technologiques du siècle dernier et la prémisse de l'exploration spatiale. Dans les premières décennies du XX^{e} siècle les prototypes d'aéronefs se sont multipliés et l'histoire de l'aviation de ces années est remplie de mémorables et spectaculaires défaillances d'entreprises.

Le premier vol régulier à horaire fixe, de Paris à Londres, a été créé en 1919. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre Mondiale, avec le développement d'avions à réaction et l'allègement progressif des matériaux de construction, que l'aviation s'est établie de façon permanente. Le premier avion de transport de passagers à réaction, le De Haviland Comet a été mis en service en janvier 1952. Le Boeing 707, entré en service en 1958 a profité du retrait du Comet et en quelques années le transport aérien a fait disparaître le transport intercontinental de personnes par voie maritime. Les avions modernes comme l'A380 d'Airbus, transportent plusieurs centaines de passagers. Actuellement, on peut atteindre n'importe quel point de la Terre par des vols de moins de 24 heures.

En ce qui concerne les marchandises, la mondialisation des marchés a considérablement fait croître le trafic par voie maritime. La quantité de marchandises actuellement transportées par bateau dans le monde est quatre fois supérieure à celle transportée par camions et 400 fois plus élevée que celle transportée par voie aérienne. La consommation d'énergie pour le transport par mer est la moitié de celle du transport routier, mais 20 fois celle du transport par air.

Cependant, pour transporter la charge d'un grand navire, il faudrait plusieurs centaines d'énormes avions cargos.

Les moyens de transport sont devenus l'icône du monde développé. On estime que la distance totale parcourue par les passagers des différents types de transport est de 800 milliards de kilomètres par an, 85% de cette distance étant parcourue en voiture. Les conséquences négatives de cette expansion inexorable sont des accidents de la route, la pollution de l'air et la modification du climat.

Le pétrole transformé en nourriture

Avant l'entrée dans l'ère de l'utilisation de combustibles fossiles, la plus grosse part de la population active d'une nation avait une activité agricole. Aujourd'hui, aux Etats-Unis, qui sont le plus grand producteur mondial de denrées alimentaires, les travailleurs agricoles représentent moins de 1% de la population active. Dans l'agriculture moderne, l'œuvre de l'homme et des animaux a été presque entièrement remplacée par l'énergie fournie par les combustibles fossiles. Ils sont utilisés pour fabriquer et faire fonctionner des machines agricoles, pour irriguer les terres, pour produire et distribuer des engrais et des pesticides, pour conserver, transformer et transporter les récoltes.

Au cours du XXe siècle, l'extension des terres cultivées n'a été que de 30%, mais, dans le même temps, le volume des récoltes a été multiplié par 6 et cela grâce à une augmentation de 150 fois de l'énergie utilisée dans l'agriculture, principalement sous la forme de combustibles fossiles et d'électricité. La production agricole mondiale permet aujourd'hui de nourrir environ 4 personnes par hectare, tandis qu'en 1900, elle ne permettait d'en nourir que 1,5.

Aujourd'hui l'agriculture est devenue pétroléo dépendante. Le coût énergétique de production est de 0,1 tep / tonne pour le blé et de 0,25 tep / tonne pour le riz. Pour les autres produits agricoles, le rapport de l'énergie contenue à l'énergie consommée pour les produire est encore pire. Par exemple,les légumes produits en serres peuvent avoir un contenu énergétique alimentaire jusqu'à 50 fois moindre que l'énergie utilisée pour les produire.

Il a également été estimé que pour élever une vache de 5 quintaux il est nécessaire de dépenser 6 barils de pétrole (environ 1000 litres). Pour produire 1 kg de veau il faut 7 litres de pétrole.

Du feu à l'air conditionné

L'homme des cavernes s'est chauffé avec le feu. Le bois a été pendant des millénaires une source d'énergie utilisée pour cuire les aliments et pour la protection contre le froid. Même aujourd'hui, près d'un milliard de personnes ne dispose que de bois, de broussailles et de bouse séchée pour le chauffage et la cuisson. En Afrique, si l'on exclut l'Afrique du Sud et les pays méditerranéens, la biomasse représente encore 70% de la consommation d'énergie primaire **.

En Europe, depuis la Renaissance les maisons des nobles et des riches bourgeois

étaient chauffées par des poêles à bois, qui sont, avec le temps, devenus des œuvres d'art que nous pouvons aujourd'hui admirer dans les musées. Avec l'avènement du charbon il a été possible de construire des chaudières plus puissantes et avec l'aide du moteur électrique de passer à la circulation forcée de l'air ou à des systèmes de chauffage central à eau chaude.

À cause du terrible impact environnemental des fumées qu'il produit (aujourd'hui encore on utilise l'expression « smog » inventée au début du siècle précédent pour qualifier la pollution londonienne) le charbon a été remplacé progressivement par le pétrole, puis par le gaz. Au milieu du XX^{e} siècle, quand le coût de l'électricité était le plus faible et la richesse de la population la plus élevée, on a vu aux États-Unis se généraliser l'utilisation de la climatisation, avec un climatiseur à chaque fenêtre, puis à travers des systèmes centralisés. L'utilisation de la climatisation s'est rapidement étendu aux autres pays riches et aux régions du monde au climat chaud et humide. Aujourd'hui la plupart des voitures ont un climatiseur.

**La biomasse est faite principalement de bois, de résidus agricoles, de bouse séchée, et des autres matières naturelles et déchets utilisés comme combustible dans les pays pauvres. La partie la plus vulnérable de la population, principalement des femmes, passe une grande partie de la journée à trouver des ressources énergétiques dans l'environnement et de l'eau à usage domestique. Pour des millions de personnes la possibilité de presser un bouton ou de tourner un robinet pour accéder à l'énergie ou à l'eau reste une perspective lointaine.

L'installation de la climatisation dans les bâtiments a profondément modifié la répartition de la consommation d'électricité au cours d'une année, même en Italie. Jusqu'à récemment, le pic de consommation était enregistrée au cours des mois les plus froids et les plus sombres de l'hiver, maintenant il se trouve les jours d'été les plus chauds.

La consommation d'énergie pour chauffer ou rafraîchir une habitation dépend de nombreux facteurs, comme l'orientation, la disposition architecturale, l'isolation des murs et, plus important encore, des fenêtres. Une étude menée en Allemagne a montré, en 1970, qu'une maison de 100 mètres carrés consomme environ 3500 litres de fuel par an, après les dispositions pour l'isolation thermique prises en 1982, la consommation a chuté à 1700 litres, et ensuite elle est passée à 1000 litres après les nouvelles mesures de 1995. Avec la technologie moderne d'aujourd'hui, la consommation peut descendre à 500 litres. Dans les régions tempérées, il est même possible de construire des maisons passives qui ne consomment pas d'énergie, qui utilisent seulement la lumière et la chaleur du soleil. Actuellement en Allemagne, il existe plus de 4000 maisons passives.

Même si l'on améliore la structure de nos maisons, le danger que leur consommation d'énergie continue de croître restera. Cela dépend de la croissance explosive des équipements qui consomment de l'électricité que nous y installons. Le rendement énergétique de certains appareils (comme les ampoules, les réfrigérateurs et les machines à laver) augmente, mais celle des autres diminue avec les téléviseurs plasma et les téléphones cellulaires. La part d'électricité consommée de la manière la plus illogique et inutile est celle des appareils en

veille, qui sont allumés mais qui ne fonctionnent pas. Nous en reparlerons dans le prochain chapitre.

De la poste à cheval au courrier électronique

Ces dernières années rien n'a changé plus rapidement que la quantité et la vitesse de propagation de l'information. Un professeur d'une université de Californie a calculé qu'un seul numéro du New York Times contient plus d'informations que ce qu'un contemporain de Shakespeare pouvait collecter au cours de sa vie.

Encore en 1800, comme au temps des Romains, l'information était transmise par des voyageurs ou, dans des circonstances très spécifiques, par des messagers montant des chevaux rapides, qui pouvaient parcourir au plus 200 km par jour. La nouvelle de la victoire de l'amiral Nelson, qui, en août 1803 a détruit la flotte franco-espagnole à Trafalgar, à l'ouest de Gibraltar, est arrivée à Londres seulement en Octobre. En 1865, l'assassinat du président des États-Unis, Lincoln, a été connue en Europe seulement une semaine plus tard. En 1953, le manuscrit de l'ouvrage fondamental de Watson et Crick, la structure de l'ADN a pris plus d'un mois pour parvenir à la rédaction de la revue Nature. Aujourd'hui, les articles scientifiques sont soumis à des éditeurs par l'intermédiaire de l'Internet en quelques secondes.

Tout ceci a évidemment un lien direct avec le prix des transmissions. Par exemple, pour envoyer un télégramme à travers l'Atlantique dans les années cinquante, il fallait dépenser 20 cents par mot. Aujourd'hui, un courriel peut être transmis à l'autre bout du monde en un instant en acquittant une redevance mensuelle modeste pour une connexion fixe à internet.

Ce qu'on appelle aujourd'hui la société de l'information a mûri dans un crescendo d'inventions qui ont marqué les 130 dernières années : le téléphone, la radio, le cinéma, la télévision, les transistors, les ordinateurs, les satellites de télécommunications, Internet et le courriel. La production et la distribution en temps réel d'une énorme quantité d'information est une caractéristique de la société contemporaine.

Aujourd'hui, nous pouvons envoyer des informations en temps réel partout en tapant sur le clavier de nos ordinateurs personnels. Cette action apparemment simple est rendue possible par l'accès facile à l'énergie. Dans ce domaine, l'efficacité énergétique s'est améliorée rapidement. Le premier ordinateur électronique, l'ENIAC de 1944, consommait 200 kW tandis qu'aujourd'hui, un ordinateur de bureau consomme moins d'un millième de cette puissance, et un ordinateur portable ne nécessite que 50 W. La consommation globale, toutefois, augmente de façon exponentielle parce que dans le monde, il existe maintenant des centaines de millions d'ordinateurs accompagnés d'imprimantes, de photocopieurs, etc. De plus pour transmettre des informations nous ne consommons pas que l'énergie utilisée par nos ordinateurs, mais aussi celle requise pour maintenir actif le réseau gigantesque et complexe de télécommunications internationales, qui permet l'échange fiable et rapide des paquets d'information à tout moment.

Que cette information soit largement inutile, voir mauvaise, prêtant à confusion ou induisant en erreur, est un autre problème que quelqu'un a résumé dans l'aphorisme : lorsque vous cherchiez la sagesse, vous deviez vous contenter de la connaissance, maintenant il ne reste que l'information.

De la poudre à canon à la bombe atomique

Au cours des 150 dernières années, la disponibilité généralisée de l'énergie à des coûts toujours plus bas a aussi servi à accroître de manière impressionnante le potentiel de destruction des arsenaux du monde, ce qui a conduit l'humanité au bord de l'autodestruction. Aujourd'hui, bien que la guerre froide soit terminée depuis vingt ans, la Russie et les États-Unis ont encore dans leurs arsenaux d'environ 25 000 ogives nucléaires.

Dans l'économie de la guerre, l'énergie joue un triple rôle. En premier lieu, il faut de grandes quantités d'énergie pour produire les moyens de la guerre, fusils, canons, tanks, avions, navires, missiles, capables de battre l'ennemi, il faut aussi « emballer » le plus possible d'énergie sous une forme concentrée et la plus dévastatrice possible dans des balles, des explosifs, des bombes incendiaires, des armes chimiques, des armes nucléaires. Enfin après la guerre, il faut tout reconstruire,ce qui coûte encore une très grosse quantité d'énergie.

Les armes utilisées au milieu du XIXe siècle n'étaient pas très différentes de celles disponibles un siècle auparavant. Cependant entre 1860 et 1900 ont été mis au point de nouveaux explosifs (dynamite, RDX) beaucoup plus puissants que la poudre traditionnelle. Le développement simultané de la métallurgie, induit par l'utilisation du charbon, a fourni des aciers de meilleure qualité. Ainsi, la portée des canons est passé de 2 à 30 km entre 1860 et 1900.

La Guerre de Sécession aux États-Unis a vu apparaître les premiers navires cuirassés et le premier sous-marin. À la veille de la Première Guerre mondiale la Grande-Bretagne a décidé de convertir sa flotte du charbon au pétrole et, depuis ce temps, le pétrole est devenu le matériau stratégique le plus important sur le plan militaire.

Les avions militaires ont fait leur apparition sur les champs de bataille de la Première Guerre mondiale, où pour la première fois, ont également été utilisées sur une grande échelle des armes chimiques (chlore, gaz moutarde, phosgène) qui ont causé la mort de centaines de milliers de soldats, en particulier sur le front franco-allemand. Entre les deux guerres mondiales, les chasseurs, les bombardiers et les porte-avions ont été développés en quelques années.

Le 6 et le 9 août 1945 Hiroshima et Nagasaki ont été rasées par la première (et jusqu'ici la seule) utilisation à des fins militaires des armes nucléaires. Après la guerre, avec le monde divisé en deux blocs, on a pu assister a eu une folle course aux armements qui a conduit au développement de nouvelles techniques de destruction comme les bombardiers à longue distance, les sous-marins et les porte-avions à propulsion nucléaire, les missiles intercontinentaux. Toutes ces

machines de guerre ont été dotées de la puissance destructrice d'armes nucléaires, des milliers de fois plus puissantes que celles utilisée à Hiroshima et à Nagasaki. On estime qu'à partir de 1940 environ 10% de toute l'énergie utilisée dans le monde a été utilisée pour le développement et la fabrication des armements. La puissance de feu déployée a progressivement augmenté : en 1914 l'aviation britannique comptait 154 avions, au cours de la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis ont fabriqué plus de 250 000 avions de guerre.

L'attaque la plus massive de chars de la Première Guerre mondiale en a impliqué 600, alors que dans l'assaut final sur Berlin les soviétiques ont utilisées 8000 chars d'assaut, 11 000 avions et 50 000 fusils et lance-roquettes.

En 1944, les Alliés ont réussi à se doter d'une puissance de feu trois fois supérieure à celle des puissances de l'Axe, désespérément à court de ressources énergétiques pour alimenter la machine de guerre, inversant ainsi le cours du conflit. Pour écraser le régime nazi de l'Allemagne, ils ont lâché un total d'environ un million de tonnes de bombes. Le coût économique du déploiement de cette puissance de feu a été colossal : en 1944, les États-Unis et l'Union Soviétique ont utilisés en dépenses militaires, respectivement, 54% et 75% de leur produit intérieur brut.

Le coût humain de la puissance destructrice des armes de guerre a fortement augmenté. La bataille la plus sanglante de la Première Guerre mondiale, la bataille de la Somme, 1916-1918, a causé environ un million de victimes, le siège de Stalingrad du 22 août 1942 au 2 février 1943 coûté la vie à plus de deux million de personnes. Les bombardements alliés de l'Allemagne ont causé 600 000 morts, les deux bombes atomiques larguées sur le Japon ont en quelques instants exterminé plus de 100 000 civils innocents. Les pertes de la Seconde Guerre mondiale se sont élevées à environ 55 millions, dont 70% des civils.

Le carnage n'a pas pris fin avec la reddition inconditionnelle de l'Allemagne et du Japon en 1945 car il y a eu depuis lors une suite continue de conflits, grands et petits qui ont causé des millions de morts supplémentaires.

Pour donner une idée des ressources utilisées aujourd'hui dans le développement des armes et la guerre - appelées pudiquement « dépenses de défense » - on pense que pour la période 2004-2008, le budget militaire de la plus grande puissance mondiale, les États-Unis s'élevait à 2,1 trillions de dollars. Un chiffre qui est difficile à imaginer, d'environ 1,3 millions de milliards d'euros, soit environ 200 euros pour chaque habitant de la Terre.

Problèmes émergents

Au cours de cette exploration, nous avons voulu donner une idée de comment tous les aspects importants de nos vies dépendent de l'énergie.

Il convient de souligner que les grands changements dont nous avons parlés n'ont pas touchés toutes les nations du monde, et que même tous les citoyens des pays « avancées » n'ont pas bénéficié de cette abondance d'énergie. Il s'est créé une

spirale de la disponibilité de l'énergie, du développement technologique, de la richesse, de la consommation d'énergie qui a entraîné de grandes inégalités difficiles à colmater.

Par exemple, aux États-Unis, avec 303 millions d'habitants, le nombre de voitures est de 780 pour 1000 habitants, bébés compris. Au lieu de cela, la Chine et l'Inde, avec une population totale de 2 milliards 400 millions d'habitants ont moins de 20 voitures pour 1000 habitants.

Pour remédier à ces inégalités d'énormes quantités d'énergie doivent être mises à la disposition des pays en développement. À titre d'illustration, si la Chine et l'Inde avaient 780 voitures pour mille habitants, avec une distance parcourue moyenne de 10 000 km par an et avec une consommation de 7 litres aux 100 km, les deux pays consommeraient environ 8 milliards de barils de pétrole par an, soit 22 millions de barils par jour, soit encore plus du double de la production de l'Arabie saoudite, un quart de la production mondiale d'énergie.

Qui fournira le combustible à la Chine ? Cette question, qui circule déjà depuis des années dans les milieux économiques et politiques, est déjà un cauchemar qui s'est renforcé lors des fortes hausses du prix du pétrole à partir de 2003 et dans le fait que les pays développés continuent d'augmenter constamment leur consommation énergétique. L'histoire des 150 dernières années montre que, dans les pays les plus développés, la diffusion de plus en plus large de richesse et bien-être matériel crée de nouveaux besoins. On peut penser, par exemple, au tourisme qui, presque inexistant il y a 50 ans, est aujourd'hui une des activités les plus énergivore du monde.

Utiliser les combustibles fossiles pour obtenir de l'énergie est très confortable et même très utile. Mais on parle d'un véritable trésor, trouvé dans les cales de notre astronef, que nous utilisons de manière intensive. Au cours des derniers 20-30 ans, nous avons réalisé que ce trésor pose des problèmes nombreux et graves. Son destin inéluctable est l'épuisement, son utilisation cause de graves préjudices à la santé de l'homme et à l'environnement, sa localisation irrégulière dans différentes zones de la planète crée des inégalités économiques, des tensions politiques, voire des guerres.

Comment résoudre ces problèmes ? Comment peut-on en même temps combler les inégalités qui menacent la paix, répondre aux besoins de celui qui est habitué au luxe et au gaspillage, faire face à la disponibilité limitée de combustibles fossiles et éviter les dommages causés à la biosphère par leur usage ?

Un énorme défi nous attend : nous devons y faire face au plus tôt, avant que ce ne soient des événements physiques ingouvernables - qui pourraient s'accompagner de dynamiques politique et sociale fondées sur la violence - qui ne conduisent l'humanité vers un avenir douloureux. Comme nous le verrons, le défi n'est pas impossible à surmonter il pourrait même devenir une grande chance pour l'humanité.

CHAPITRE 3

Combien d'énergie gaspillons nous ?

Le bon sens y était, mais il était masqué par la peur du sens commun
Alexandre Manzoni

Comme nous l'avons vu, la deuxième loi de la thermodynamique rend insurmontables les limites physiques de la conversion utile d'énergie. Lorsque nous produisons, plus précisément, lorsque nous transformons de l'énergie, une part plus ou moins importante du produit final est de la chaleur, qui ne peut jamais être pleinement utilisée. Le gaspillage d'énergie est donc en un sens, une loi de la physique.

Malheureusement, la disponibilité massive de l'énergie bon marché, qu'a connue une partie de l'humanité au cours des cinquante dernières années, a discrètement élargi le gaspillage d'énergie au-delà du minimum qu'imposent les contraintes de la physique. Ce qui est un élément clé de notre mode de vie, est en fait un véritable affront au bon sens.

Aujourd'hui, par exemple aux États-Unis, seulement 44% de l'énergie primaire se transforme en service énergiquement utile et 56% sont perdus. Le système industriel pourrait recycler une partie de cette « perte », et produire une quantité d'électricité égale à celle de 65 centrales de 1000 MW. Une telle action éliminerait complètement le débat si troublé autour de la relance de l'industrie nucléaire américaine, moribonde depuis maintenant trente ans.

La plus grande explosion de tous les temps

Le 9 septembre n'est une journée célébrée dans aucun pays du monde. Et pourtant dans la matinée du 13 septembre 1913 il s'est produit un évènement extraordinaire ignoré de tous, qui a littéralement changé le cours de l'histoire. Ce jour là les laboratoires de l'industrie chimique BASF, près de Ludwighafen en Rhénanie, ont débuté la production industrielle de l'ammoniac, une molécule constituée d'un atome d'azote et de trois atomes d'hydrogène, NH₃. Le chimiste Fritz Haber et l'ingénieur Carl Bosh, fiers à juste titre du succès de leur étude, n'ont probablement pas imaginé qu'ils initiaient la plus grande explosion de l'histoire : l'explosion de la population humaine.

L'azote est un élément indispensable à la vie, contenu dans l'alimentation humaine et l'organisme utilise un composé ammoniaqué essentiel pour synthétiser les protéines.

La molécule d'azote N_2 est inerte et de ce fait difficile à utiliser dans des réactions chimiques. Elle est pourtant extrêmement abondante car elle constitue 80% de l'air que nous respirons. Jusqu'au 9 septembre 1913 seule la nature, à travers

quelques bactéries, était capable de fixer l'azote atmosphérique, de l'extraire de l'air et de l'utiliser dans des composés biologiques. L'homme se contentait de fournir aux terres cultivées une modeste quantité d'azote supplémentaire en recyclant les déjections animales et d'autres déchets d'origine protéique.

Ce jour de septembre 1913 l'agriculture a tourné une page en démarrant la « révolution verte » par l'usage d'engrais azotés synthétisés à partir de l'ammoniac. Elle a ainsi sensiblement augmenté la productivité des terres agricoles et la disponibilité des produits agricoles.

La simultanéité de la disponibilité d'engrais synthétiques et d'énergie fossile, rend compte en grande partie de l'impressionnante croissance démographique qui s'est produite dans les premières décennies du XX^{e} siècle. 5 000 ans ont été nécessaires à la naissance du premier milliard de personnes. Le deuxième milliard est né à peu près au cours des cinquante années suivantes (1927 - 1974). Les deux milliards les plus récents sont nés en seulement 25 ans (1974 - 1999).

Aujourd'hui la population mondiale s'élève à environ 6,7 milliards de personnes et devrait se stabiliser autour de 9 - 10 milliards aux alentours de 2050. Chaque jour la population de la planète croît de 200 000 unités, donc chaque année de 75 million d'unités. Chaque matinée naît la valeur de la population de Strasbourg et chaque année un peu moins que la population de l'Allemagne. La plupart de ces personnes n'ont pas droit à une existence digne, pas plus qu'elles n'ont droit à leur juste part d'alimentation et d'énergie.

À l'aube du XXI^{e} siècle, la disponibilité alimentaire n'est pas le problème le plus immédiat que l'humanité doive affronter, si ce n'est peut-être au niveau de la disponibilité et de la capacité économique. Tant dans les pays riches que dans ceux en développement, nous en sommes encore aujourd'hui à abuser de cette réalisation extraordinaire, la suralimentation provoque une augmentation du nombre de méfaits pour la santé humaine et l'environnement. Nous devons rester vigilants car l'engraissement de l'humanité est un signe manifeste de l'appauvrissement progressif des sols fertiles de la planète, à cause d'une gestion souvent insouciante, amplifiée par les effets du réchauffement climatique.

Obèses et malheureux

C'était difficile à imaginer, mais c'est arrivé. Dans le monde d'aujourd'hui, il y a 1,3 milliards de personnes sont surpoids ou obèses est « seulement » 800 millions qui ont des problèmes quotidiens d'approvisionnement alimentaire. Sur le papier on pourrait supprimer la faim dans le monde.

L'augmentation de l'obésité est particulièrement marquée dans les pays en développement atteignant dans certains cas, des niveaux quasi pathologique, comme au Mexique et en Egypte, des nations qui, jusqu'à récemment, étaient souvent confrontés à la faim.

Les raisons de cette transition rapide d'une alimentation pauvre à une

surabondance alimentaire sont liés à l'accès à une consommation accrue de viande et d'huiles végétales, à la propagation des boissons sucrées au lieu d'eau, à l'urbanisation qui conduit à des modes de vie sédentaires. Les tendances alimentaires occidentales les plus délétères se répandent avec la mondialisation.

Par ailleurs, sans aller très loin, il est quasi surréaliste dans un pays comme l'Italie, qui faisait face au rachitisme et à la pellagre il y a seulement quelques décennies, de voir aujourd'hui les gens essayez d'éliminer l'excès de poids par la gymnastique et aller jusqu'à la liposuccion clinique. En l'espace de deux générations, notre relation à la nourriture est passée d'un régime de recherche à un régime de défense, de stratégies de survie à l'hyperphagie des fêtes de fin d'année.

Aujourd'hui, pour chaque calorie que nous mangeons, il faut une calorie de combustible fossile pour apporter la nourriture sur notre table. Certains prétendent, avec quelque raison, que l'agriculture moderne n'est rien d'autre qu'une industrie qui transforme les combustibles fossiles en nourriture, et qui malheureusement, le fait trop souvent de manière inefficace.

Des fraises à Noël, du chou-fleur en août

La disponibilité de carburants fossiles bon marché a complètement séparé les fonctions de producteur de denrées alimentaires et de consommateur. Historiquement, et jusqu'à il y a seulement quelques décennies, ces deux fonctions étaient identiques ou à tout le moins souvent en relation directe. Personne n'est nostalgique des temps de disette et parfois de famine. Il faut toutefois reconnaître que l'énergie abondante a créé un système de distribution de nourriture qui présente des effets pervers.

Aujourd'hui on trouve dans les supermarchés des pommes chinoises, des fèves égyptiennes, des fraises de Californie, des kiwi de Nouvelle-Zélande, tous des produits qui peuvent être cultivés dans nos pays tempérés au lieu de provenir des autres continents, en consommant d'énormes quantités de carburant, en déversant dans l'atmosphère des millions de tonnes de dioxyde de carbone et de polluants cachés. Tel est le prix de notre appétence pour les produits hors saison. De goût souvent douteux, ces produits amènent à réfléchir sur la perte importante de valeurs qu'ils impliquent, comme la perception du caractère saisonnier et cyclique de la nature et, plus généralement, le sens de la limite.

Lorsque quelqu'un vous demande des conseils sur la manière d'économiser l'énergie, suggérez lui de ne pas acheter de fraises du Chili à Noël. Au début, votre interlocuteur sera perplexe, puis, après réflexion, se rendra compte que c'est l'une des meilleures choses à faire pour changer un système de consommation d'énergie que nous ne pourrons pas poursuivre indéfiniment.

De l'huile de baleine à la pollution lumineuse

Pendant des millénaires, la vie quotidienne des humains a été rythmée par le cycle des jours et des nuits. Au couché du soleil presque toutes les activités humaines s'interrompaient à cause de l'obscurité.

La nuit, jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, l'éclairage de la ville était largement laissée aux flambeaux placés devant les enseignes des magasins et des tavernes, et aux lampes votives. La situation n'était pas très différente de celle du Moyen-Âge, quand le sujet ordinaire, pour se prévenir des dangers de la nuit, se calfeutrait dans sa maison, quand les portes de la ville étaient fermées et qu'un couvre-feu était en vigueur pour la durée de l'obscurité.

Il convient également de noter que les maisons ne disposaient pas d'un vitrage isolant et parfaitement transparent, comme aujourd'hui. Les vestiges archéologiques de maisons romaines, même patricienne, nous montrent par exemple que pendant le jour, dans les mois froids, à Rome, la Ville Éternelle, on devait choisir entre laisser entrer la lumière et laisser sortir la chaleur par les fenêtres, il n'était pas possible d'avoir une maison à la fois chaude et lumineuse.

Pendant des millénaires, l'homme a utilisé le feu d'un brasier pour se réchauffer, cuire les aliments et produire de la lumière la nuit. Pour cette dernière application il a ensuite progressivement appris à dompter les flammes par l'utilisation de torches , de lampes et de lanternes dont on trouve de nombreux témoignages historiques et archéologiques dans toutes les civilisations.

L'exploitation massive des combustibles fossiles, à commencer par le charbon au XVIIe siècle a commencé à révolutionner non seulement le système de production, mais aussi la vie quotidienne des gens. L'utilisation du gaz de ville pour l'éclairage, du début du XIXe siècle, est une icône particulière de la révolution industrielle et technologique.

Depuis la seconde moitié du XIXe siècle, dans des dizaines de millions de résidences en milieu rural dans le monde, la production de lumière artificielle a été basée sur des combustibles animaux et végétaux quelques fois exotiques comme l'huile de baleine ou la cire d'abeille.

En 1879, Thomas Edison a breveté la lampe à filament de carbone. Cet appareil a été 20 fois plus efficace qu'une bougie, qui transforme en un misérable 0,01% l'énergie chimique de la cire brûlée en lumière. Le dispositif d'Edison, développé dans les années où il commence aussi à développer une technologie électrique a été une étape cruciale vers l'éclairage moderne, mais il était encore trop inefficace dans la conversion de l'électricité en lumière (0,2%) à une époque ou l'électricité coutait cher.

Dans les décennies suivantes furent introduites et perfectionnées les lampes à incandescence à filament de tungstène (1906, introduction commerciale), puis dans les années trente les lampes à vapeur de sodium de couleur jaune orangée, très efficaces, devenues le standard pour l'éclairage des rues, les tubes fluorescents dans les années quarante (souvent appelés à tort « tube à néon ») et les lampes allogènes dans les années soixante.

Les lampes actuellement définies comme « lampes à basse consommation », sont techniquement des lampes fluorescentes compactes (LFC) ; elle ont été introduites

vers 1980 et ont une efficacité de conversion 50 fois supérieure à celle de l'ampoule d'Edison.

Aujourd'hui, grâce à l'éclairage artificiel, on passe insensiblement du jour à la nuit, sans que les activités humaines ne s'arrêtent. L'affranchissement de l'obscurité est sans doute l'une des plus grandes réalisations des civilisations humaines.

Même dans ce cas, cependant, comme avec la nourriture, nous avons un peu perdu la main. En effet, l'utilisation de la lumière artificielle est devenu si omniprésente que l'on en est arrivé à la pollution lumineuse, un phénomène qui limite la vision des étoiles dans les parties de la planète les plus densément peuplées et qui a des effets négatifs sur les plantes et les oiseaux migrateurs, en modifiant leurs rythmes vitaux.

Cette forme « moderne » de pollution est bien illustrée par les images nocturnes de la Terre vue de l'espace, figure 2). Ces montages évocateurs d'images prises par satellites montrent que les régions les plus riches et les plus peuplés de la planète brillent dans la nuit. Les plus pauvres, éloignées et inhabitées, sont plongés dans l'obscurité. La comparaison des mêmes images d'il y a 10 ou 20 ans montre une forte expansion de l'éclairage artificiel.

Géographiquement, cette tendance est similaire aux cartes de la croissance économique, la Chine, l'Inde, l'Asie du Sud-Est et l'Europe d'aujourd'hui sont beaucoup plus lumineuse qu'en 1990. L'Afrique est encore presque complètement sombre. En fait, l'évolution de l'image de la Terre dans la nuit montre l'évolution de la croissance économique et donc l'augmentation de la consommation d'énergie.

Figure 2. La Terre vue de l'espace la nuit. C'est beau, mais que de lumière gaspillée ! Image courtoisie de la NASA (http://visibleearth.nasa.gov).

À bien y penser, cependant, cette information nous montre aussi une perte gigantesque. Le ciel n'a pas besoin d'être éclairé par l'homme et la lumière que nous voyons de l'espace est essentiellement gaspillée.

Il faut espérer que dans les années à venir les images de l'espace pourrons nous raconter la parabole du développement humain d'une façon tout aussi claire, mais avec des images qui évoluent en sens inverse d'une Terre qui s'assombri progressivement à mesure que nous aurons appris à vaincre l'obscurité d'une manière plus efficace et plus rationnelle. Les astronomes amateurs seront ravis. Les oiseaux migrateurs, aussi.

Plein gaz

Photographier la Terre de loin, nous a appris d'autres choses. Premièrement, nous avons réalisé que la planète bleue est entourée par l'immensité infinie, sombre, vide et sans vie. L'humanité, si elle n'est pas stupide, fera bien de garder en bon état cette merveilleuse prison dont elle ne peut s'échapper.

Parmi les nombreuses informations utiles dérivées de l'exploration spatiale, il y a celle qui illustre notre tendance malsaine à gaspiller des quantités colossales d'énergie.

L'éclairage artificiel qui est observé sur les photos prises par satellite est jaunâtre et couvre de très grandes parties de la masse terrestre. En observant en détail, on peut cependant noter de petites taches rouges très intenses en certains points particuliers de la planète, comme dans le golfe Persique, en Sibérie, au Venezuela, dans le Golfe de Guinée. Ce sont les flammes des torchères allumées sur les plus grands champs pétrolifères, où on brûle les grandes quantités de gaz combustibles fossiles, qui sont une gêne pour l'extraction du pétrole.

Au cours des 15 dernières années on a réussi à brûler de cette façon entre 150 et 170 milliards de mètres cubes de gaz par an ! C'est une quantité considérable qui équivaut à 30% de la consommation européenne, 25% du marché américain, 75% des exportations du premier producteur mondial de gaz, la Russie. Ces chiffres témoignent de manière désarmante des aberrations de notre comportement à l'ère du pétrole facile.

Un cas désespéré : le système de transport

Voyager sur les routes des États-Unis est pour les européens une expérience unique : voies larges, faible densité de trafic (sauf sur les périphériques des métropoles ...), limites de vitesse strictes et très respectées, interminables lignes droites. La traversée continentale des États-Unis dans une voiture grande-routière de 6000 cm3 de cylindrée, est un fantasme récurrent dans l'imaginaire de nombreux Européens. Le problème est que ces fantasmes de cow-boy motorisé se retrouvent même dans les rues médiévales de villes européennes. Il y en a qui poursuivent ce cauchemar américain et ils en sont fiers. Ils sont les interprètes les plus distingués d'un système de transport en phase terminale qui oscille entre la paralysie et l'effondrement.

Les véhicules circulant dans les seuls Etats-Unis consomment environ 7% de toute l'énergie primaire mondiale. C'est l'un des excès les plus insoutenables que notre civilisation du pétrole bon marché a autorisé pendant des décennies. Cette

consommation anormale ne s'explique que dans une faible mesure par le fait que, pour des raisons purement géographiques, les distances moyennes de transport routier aux États-Unis sont plus élevées qu'en Europe. Malheureusement toutes les tentatives pour faire adopter des lois qui imposent des normes plus strictes sur l'efficacité des véhicules US, inchangée depuis 1985 à une moyenne de 11,5 km / l, se sont toujours heurtées à une opposition insensée des lobbys automobiles.

La transition vers une flotte avec une consommation moyenne de carburant comparable à celle des voitures européennes ou japonaises, qui parcourent plus de 15 km par litre de carburant pourrait diminuer considérablement la consommation d'énergie sans sacrifice inacceptable pour les automobilistes américains. Pendant ce temps, la production intérieure de pétrole aux Etats-Unis n'a cessé de reculer depuis le milieu des années quatre-vingt, alors que les importations représentent maintenant plus des deux tiers des besoins, en augmentation parallèle avec les dépenses militaires liées au contrôle des couloirs énergétiques. L'inquiétude sur la couverture de la demande de pétrole brut s'est insinuée dans l' «esprit » de quelques compagnies pétrolières, qui ont fait de coûteuses campagnes publicitaires pour communiquer sur la fin imminente du pétrole bon marché**.

** Voir, par exemple www.willyoujoinus.com de Chevron, la sixième plus grande société dans le monde, ce site a également mis en ligne un angoissant compteur de consommation mondiale de pétrole en temps réel.

Le citoyen européen moyen utilise près d'un tiers de sa consommation énergétique totale pour se déplacer avec un véhicule motorisé. Naturellement de nombreux Européens aiment la marche et le vélo, même si c'est parce que voyager à pied ou à vélo dans la ville est souvent devenu plus rapide et moins cher que de le faire en voiture.

L'option pédestre est très efficace du point de vue énergétique : pour déplacer un kilogramme de graisse il faut environ 3,5 kJ par kilomètre, tandis que le même déplacement à bord d'une voiture de moyenne puissance nécessite environ 30 kJ / km. Cela n'est pas surprenant car la voiture doit transporter en plus de ses passagers un quintal de métal, de plastique, de verre, du carburant ; entre autres un moteur de 150 ch, 4 barres de protection, 2-3 mètres carrés de vitres, une batterie au plomb, une radio et six haut-parleurs de rave party ; plus une roue de secours que nous transportons toute une vie, en espérant ne pas en avoir besoin, même si souvent on ne sait même pas où elle est cachée.

La consommation d'énergie par passager d'une voiture de puissance moyenne est d'environ 2 MJ / km, sachant qu'une voiture transporte en moyenne 1,5 passagers de 80 kg environ. Un 4x4 urbain consomme au moins 60% d'énergie en plus (figure 3).

Il est plus surprenant qu'un avion moderne comme le AirBus A-380 ne consomme que moins de 3 l de carburant aux 100 km et par passager sur des vols long courrier. La consommation de carburant par passager-km a chuté des 2/3 entre un avion de ligne des années 50 - 60 tel que le Comet et un appareil moderne de type

A 340-500*. En un jour, cependant, un avion peut couvrir des distances égales à celles que la voiture parcourt en un an. La modification de l'environnement et l'impact climatique du transport aérien sont de plus en plus l'objet d'attaques, à cause surtout des longues distances parcourues et du fait que les substances polluantes sont émises à haute altitude par les moteurs, dans des zones particulièrement vulnérables de la troposphère.

* « Pollution et aviation », rapport Direction Générale de l'Aviation Civile 2003

Le chiffre, toutefois, le plus intéressant pour ce qui concerne la consommation d'énergie dans les transports est l'extraordinaire efficacité des chemins de fer qui réduisent la consommation d'énergie de 80% par rapport à la voiture. Les systèmes ferroviaires peuvent atteindre d'excellentes performances comme le montre le réseau de Trains à Grande Vitesse français (TGV) qui atteint des vitesses commerciales de 350 km / h avec une très grande sûreté : aucune mort liée à l'exploitation à grande vitesse n'est à déplorer depuis le démarrage du service en 1981, pour 1,5 milliards de passagers transportés (128 million en 2008) et ce malgré trois déraillements. Le Shinkansen japonais, qui est exploité depuis maintenant 40 ans, n'a eu lui aussi aucun mort à déplorer avec une vitesse commerciale comparable. Ce train a battu en 2003 le record absolu de ponctualité avec un écart de seulement 6 secondes en moyenne sur toute l'année !

Il est instructif de comparer cette sureté avec celle d'autres modes de transport. Par exemple en Europe des 27 (UE-27) les accidents de la circulation sont actuellement responsables chaque année de plus de 39 000 mille morts, et de plus de deux millions de blessés, dont certains sont en invalidité permanente. Les victimes de cette guerre sont régulièrement sacrifiées sur l'autel de la croissance économique devenue une fin en soi, qui n'épargne aucune catégorie, corporation, syndicat ou parti politique. Avec les 39 000 mille morts sur les routes les affaires sont en plein essor pour les entreprises d'automobiles, les fournisseurs de gaz et d'électricité, les garagistes, les maisons de soins, les infirmières, les pompes funèbres et cela fait croître le produit intérieur brut. Cela suffit pour perpétuer un système inefficace et malades.

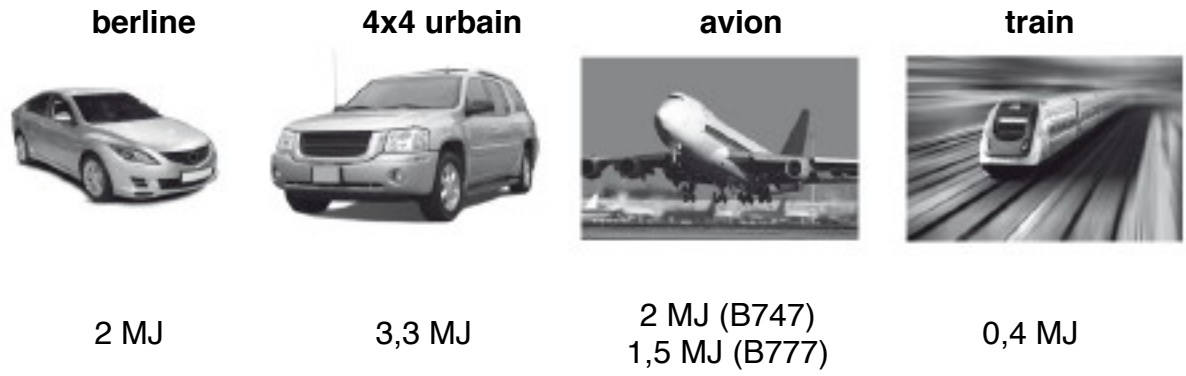


Figure 3. Comparaison des performances de certains moyens de transport, exprimée en termes d'énergie consommée par passager-kilomètre. Source: V. Smil, Energy : A Beginner's Guide, One World 2006

Si quelqu'un suggère, calmement, données à l'appui, que le système de transport est dans une condition désespérée, il est immédiatement traité de troglodyte écervelé, opposé à l'avancement inexorable de la civilisation humaine. Il ne se passera pas des siècles pourtant, ni même des décennies, avant que le vent ne tourne. À Pékin et à Bangalore les ventes de voitures continuent de croître de manière exponentielle, mais dans le même temps, les PDG des plus grandes compagnies pétrolières mondiales disent franchement qu'ils n'ont aucune idée des endroits où trouver 15 millions de barils de pétrole supplémentaires par jour. Franchir cet obstacle sera pourtant nécessaire dans les dix ans.

Si nous ne changeons pas le système de transport, le système de transport nous changera. Dans ce qui précède nous avons essayé de donner quelques exemples de gaspillages d'énergie qui caractérisent la société moderne et notre vie de tous les jours. Arrivés à ce point vous vous demandez peut-être comment vous pouvez personnellement contribuer à faire machine arrière. Des conseils pour économiser l'énergie et réduire les déchets sont maintenant disponibles un peu partout. Parmi les plus actifs dans les campagnes d'information ont trouve les consommateurs d'énergie qui, inquiets des projections négatives sur la fourniture d'énergie primaire au cours des deux prochaines décennies, ont adopté la stratégie du « mieux vaut prévenir que guérir »**.

Dans la lutte contre les déchets, l'objectif premier est, comme toujours, d'acquérir d'abord les connaissances nécessaires pour comprendre où et comment se fait la consommation d'énergie pour être plus incisif dans l'action. Malheureusement, il y a une grande disparité entre la perception que nous avons de notre consommation d'énergie et sa réalité.

Comme le montre la figure 4, le citoyen européen moyen est d'avis que 40% de sa consommation va à ses appareils électriques et à l'éclairage. En réalité, ces consommations sont 5 fois plus faibles que perçues, mais elles sont beaucoup plus directement ressenties parce qu'elles sont visibles.

La réalité est qu'en moyenne, plus de la moitié de l'énergie consommée par les citoyens européens est consacrée à chauffer les pièces dans lesquelles il vit, et près d'un autre tiers est utilisé pour alimenter ses voitures. La première chose à faire est donc de mettre des vêtements plus chauds et de baisser le thermostat ambiant de 21 à 19 degrés. Cela permet de réduire jusqu'à 20% la consommation pour le chauffage et permet d'économiser beaucoup d'argent sur la facture.

** Voir par exemple la campagne ENI « Consommez mieux, et gagnez sur tout » www.30percento.it.

Les données à la figure 4 nous disent que nous devons nous concentrer sur la voiture. Il faut d'abord en acheter une qui consomme peu et d'éviter sagement de l'utiliser sur de courtes distances ; il faut aussi faire tourner le moteur à bas régime et vérifier la pression des pneus régulièrement. Il est particulièrement judicieux de limiter sa vitesse sur autoroute à 110 km / h pour économiser jusqu'à 35% de carburant.

Il est également clair que si nous utilisons les 100 € économisés pour acheter deux billets d'avion à prix cassé pour passer un week-end en Corse, nos efforts d'économie sur l'autoroute auront été totalement inutiles.

L'électricité ne constitue qu'un quart de la consommation d'énergie. Toutefois, la consommation d'électricité en Europe a augmenté plus rapidement que la consommation totale d'énergie, donc, même si elle est inférieure à ce que nous percevons, elle doit être étroitement surveillée pour assurer une efficace lutte anti-gaspi.

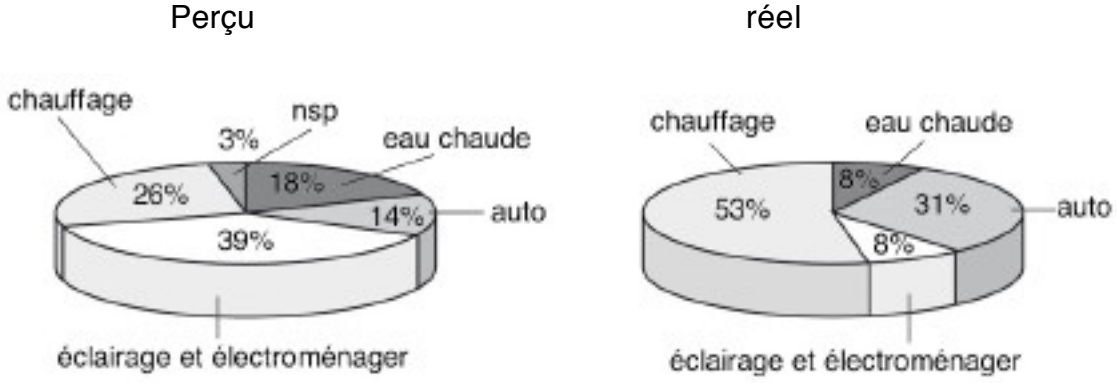


Figure 4. Consommation domestique d'énergie en Europe : la distribution perçue par les citoyens (à gauche) et réelle (à droite). nsp = ne sait pas.
Source : Eurobaromètre 2007.

Dans de nombreux foyers on chauffe l'eau pour la douche ou le bain à l'électricité. Cela constitue un gaspillage de ressources vraiment absurde en termes de thermodynamique. L'énergie électrique, précieuse et concentrée, provient souvent d'une centrale électrique où elle a été engendrée par de la chaleur. Dans la plupart des pays la chaleur est produite dans les centrales en brûlant des combustibles fossiles, non renouvelables et polluants, et seul un tiers de la chaleur est transformé en électricité, le reste (2/3) est perdu.

Un autre source de pertes très répandue provient des appareils qui restent en veille inutilement : les téléviseurs, les lecteurs DVD, les appareils audio et les ordinateurs.* La veille est indispensable, bien sûr, dans certains dispositifs comme les systèmes d'alarme et les portes automatiques, par exemple. En Europe, la consommation de ce poste « silencieux » représente 6% de la demande totale d'électricité, égale à la moitié de la consommation totale pour l'éclairage. Chacun de ces appareils en veille consomme actuellement de 5 à 10 W, mais les nouvelles technologies permettront bientôt de réduire leur consommation à moins de 0,1 W par appareil. À propos de l'éclairage, son efficacité intrinsèque est encore très faible. En tenant compte de l'efficacité de la production d'électricité, de la transmission et la conversion en lumière, sur 100 unités d'énergie primaire produite dans une centrale thermique, moins de 1 unité se retrouve sous forme de lumière dans une ampoule à incandescence. Plus de 99 unités sont converties en chaleur et déversées dans le milieu ambiant comme un déchet.

Ces gaspillages angoissants vont cependant commencer à diminuer en raison du remplacement progressif des lampes à incandescence par des ampoules

fluorescentes et de l'émergence de nouvelles technologies d'éclairage à base de semiconducteurs (LED et OLED).

Peut-être réussira-t-on à convaincre les gens qu'il est absolument nécessaire de rendre plus efficace la production de chaleur, de lumière et le transport. Toutefois, il ne faut pas se faire d'illusions, cela ne sera pas suffisant pour affronter avec succès les épreuves de la transition énergétique qui nous attend.

En général, l'histoire de l'énergie et du développement technologique nous ont appris que l'amélioration de l'efficacité de conversion de l'énergie est toujours accompagnée d'une augmentation de la consommation. Car, en effet, l'augmentation de l'efficacité énergétique fait croître la richesse matérielle des personnes et donc leur capacité d'acheter des produits nouveaux.

De 1999 à 2004, par exemple, la consommation d'électricité dans l'UE a augmenté de 10,8%, en parallèle avec l'accroissement du produit intérieur brut (PIB) sur la même période, et ce malgré l'introduction de règlements et de technologies qui ont amélioré l'efficacité énergétique. Il doit dès lors entrer dans le sens commun un concept simple mais peu attrayant : en vue de la transition énergétique à venir, les citoyens les plus riches de la planète, dont nous faisons partie, doivent réduire leur consommation d'énergie et pas seulement « un peu ». Il est clair qu'accompagner des enfants à l'école en voiture est le plus souvent une perte d'énergie. Cependant, il y a des responsabilités qui vont au-delà du sens civique des gens ordinaires et qui remettent en cause les classes dirigeantes incompétentes et incapables de faire des plans à long plans terme.

Combien de candidats donnent la priorité dans leur programme électoral à la création de pistes cyclables sécurisées ? Ce serait pourtant un grand investissement pour l'amélioration de la qualité de vie et des finances publiques : moins de pollution, moins d'obésité, moins de routes, moins d'hospitalisations, moindre coût pour la Sécurité Sociale, mais moins de PIB.

Face à cette inaction il est déprimant de voir le zèle qui est mis et l'énergie qui est dépensée pour réclamer des fonds publics pour construire de nouvelles autoroutes et des routes de contournement qui seront prêtes dans 15 ans, quand on ne peut plus se permettre le système actuel de transport trop consommateur d'énergie. Les infrastructures que nous devons concevoir aujourd'hui, sans perdre un instant, sont celles du transport public et de masse, notamment le rail. Le peu de ressources disponibles devraient être concentrées dessus et le développement des TGV et autres ICE devraient être généralisés à l'Europe entière. À Berlin, une ville parmi les plus modernes du monde, au cours des quinze dernières années, des centaines de kilomètres de pistes cyclables ont été créées et la circulation automobile a diminué de 20%. En Californie, l'état le plus riche de la nation la plus riche du monde, la consommation d'énergie par habitant est plus faible aujourd'hui qu'en 1975. Il est donc démontré que les riches, s'ils le souhaitent, peuvent consommer moins d'énergie.

CHAPITRE 4

Combien d'énergie nous reste-t-il dans la cale ?

L'énergie des combustibles fossiles est-elle véritablement la seule qui puisse répondre aux besoins de notre vie moderne et de notre civilisation ?
Giacomo Ciamician, 1912

L'énergie qui nous est la plus utile est concentrée, transportable et stockable. Les combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel répondent chacun à leur manière à ces trois exigences.

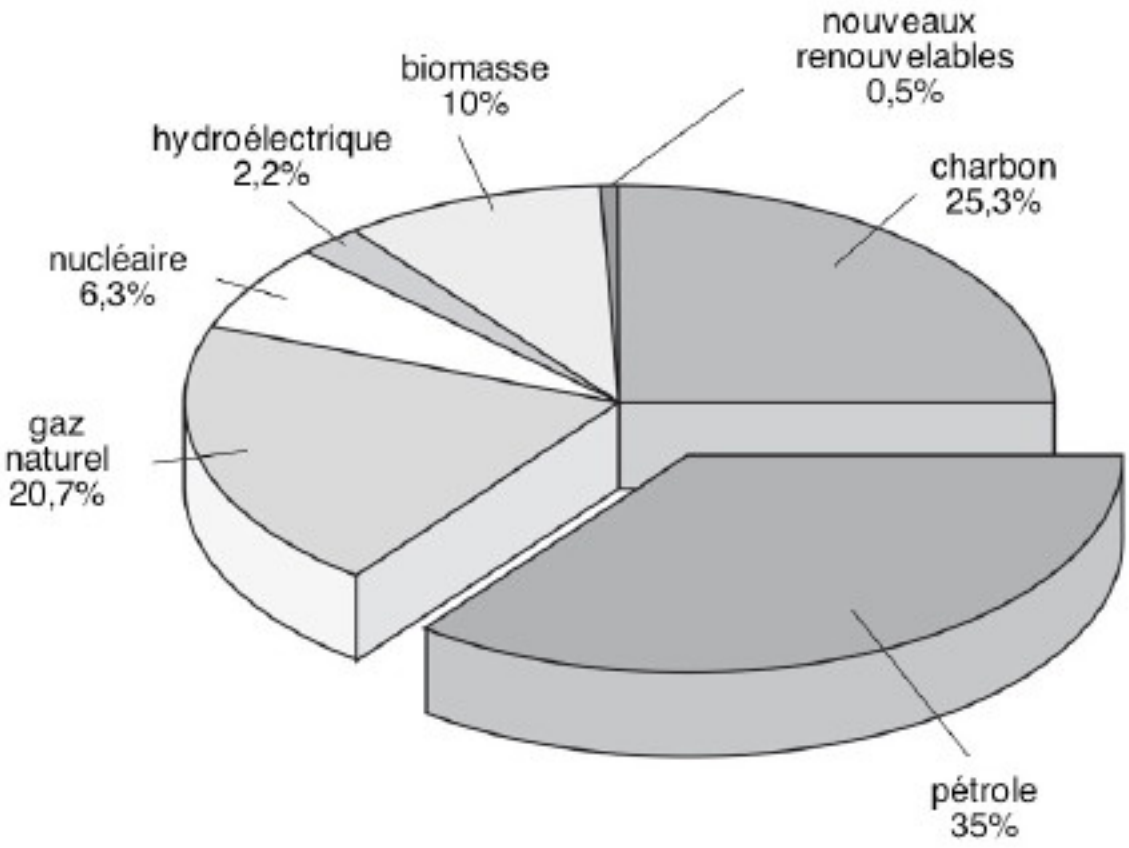
Actuellement, comme le montre la figure 5, les six grandes sources d'énergie primaires sont : le pétrole (35%), le charbon (25%), le gaz naturel (21%), la biomasse (10%), le nucléaire (6,5%), l'hydro-électrique (2%) et les « énergies nouvelles » renouvelables (0,5%). Plus de 80% de l'énergie utilisée dans le monde provient de combustibles fossiles, qui sont des ressources limitées et non renouvelables. Un trésor conservé pendant des millions d'années dans la soute du vaisseau spatial Terre, et que nous n'avons commencé à consommer de manière intensive que dans les cent dernières années.

Les combustibles fossiles sont une ressource précieuse, mais non renouvelable. En d'autres termes ils ne peuvent être utilisés qu'une seule fois.

Le pétrole

Dès les premières années du siècle dernier, la consommation de pétrole a augmenté sans cesse. Dans la phase historique actuelle il est la source d'énergie la plus importante et pour certaines application, comme produire du carburant pour les avions, il est irremplaçable.

Donc, jusqu'à présent, l'extraction conventionnelle du pétrole a été en mesure de faire face à la demande. Mais combien de temps cela peut-il durer ? Un proverbe saoudien moderne dit : « Mon père chevauchait un chameau, je conduis une voiture, mon fils conduit un avion à réaction, son fils va monter un chameau ». Traduit en termes scientifiques, cela signifie qu'un jour la production de pétrole atteindra un pic, puis déclinera inexorablement, comme le montre la figure 6. Les conséquences, dans un système économique qui nécessite des quantités croissantes d'énergie, sont facilement prévisibles. Si on ne se prépare pas à temps pour trouver des sources d'énergie de remplacement, on assistera à une hausse continue des prix, comme toujours pour les marchandises en quantité insuffisante et il y aura des crises économiques et politiques, et une course pour s'accaparer les réserves disponibles.



total en en 2005: 11 435 Mtep

Figure 5. Les principales sources d'énergie primaires utilisées dans le monde. Source : IEA 2007

Comme un exercice ou pour le plaisir (façon de parler ...) Imaginez comment seraient transformées nos vies si nous interrompions les flux de pétrole et de gaz qui alimentent silencieusement mais sans cesse, chaque activité quotidienne. Tout le monde souffrirait, de devoir fournir le moyen de chauffer les habitations, sans compter les « détails » tels que l'hygiène personnelle ou la possibilité de se rendre au travail, et donc de payer les fournitures.

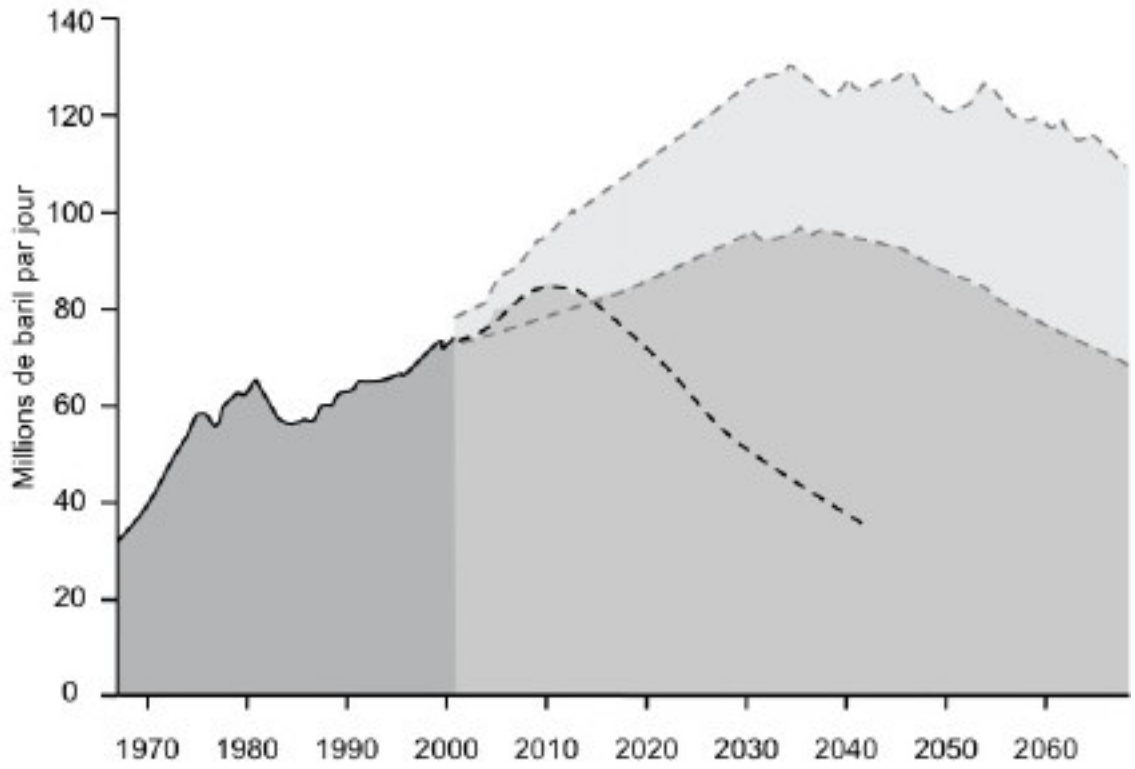


Figure 6. Évolution dans le temps de la production mondiale de pétrole. Selon la version pessimiste, le pic de production se situe vers 2010 (pointillés noirs), dans la version optimiste, entre 2035 et 2040 (courbes grise).
Source : Alexandra Witze, Nature janvier 2007, p.14

Qu'adviendrait-il de notre monde moderne dont nous sommes fiers ? Par exemple, dans un gratte-ciel, véritable icône du progrès, on ne peut même pas respirer sans une consommation continu d'énergie, puisque les fenêtres sont scellées. Parmi les rares qui ont gardé un morceau de terre, qui serait en mesure de cultiver sans l'aide d'un tracteur?

Dans cette hypothèse de pénurie de pétrole et de gaz, qui nous l'espérons, restera un simple exercice intellectuel, la plupart des processus d'urbanisation au cours des trente dernières années, ont reposé sur l'illusion que le pétrole bon marché va durer éternellement. On a ainsi construit des banlieues démesurées adaptées aux voitures rapides, dominées par les centres commerciaux aux vastes parkings qui ont draîné l'âme des centres urbains. Le trafic a augmenté, mais on n'a pas suffisamment investi pour moderniser et améliorer l'infrastructure des transports publics.

Le pic pétrolier

Il est difficile de déterminer le moment où la production de pétrole va atteindre son pic. Il y a certainement des champs pétrolifères qui n'ont pas encore été découverts, mais au cours des trois décennies passées on n'a pas trouvé de grands gisements de bonne qualité, et il est certain que les gisements géants de Cantarell (60% de la production mexicaine), de Prudhoe Bay (Alaska, le plus grand

champ pétrolifère en Amérique du Nord), de Statfjord (Norvège, les plus grands gisements en mer du Nord) sont en déclin inéluctable. Il existe également des doutes sérieux sur la durabilité des deux plus grands gisements de la péninsule arabique, Ghawar (40% de la production en Arabie saoudite) et Burgan (68% de la production du Koweït) : les autorités locales entretiennent un halo dense de mystère autour de leurs réserves de production. Une autre chose est certaine, c'est que la recherche de nouveaux champs de pétrole exige d'importants investissements à haut risque avec un retour possible seulement sur le long terme, des conditions difficiles à accepter pour les financiers internationaux.

Les optimistes croient que le pic de production serat atteint dans une trentaine d'années, tandis que les pessimistes, eux, pensent qu'il a déjà été passé entre 2005 et 2010. Il en est même, qui disent que le pétrole est encore très abondant, qu'on peut l'atteindre en creusant des puits plus profonds, en exploitant les sables et les schistes bitumineux (figure 6. réserves pétrolières non conventionnelles), concentrés principalement au Canada et aux États-Unis ou l'obtenir à partir du charbon. Personne ne dit cependant si cela aura un sens d'un point de vue économique et énergétique, ou si cela sera durable d'un point de vue environnemental.

Lorsque l'on considère l'augmentation incessante des prix, les deux guerres du Golfe, les tensions politiques entre les États-Unis et l'Iran et les zones d'instabilité politique du Moyen-Orient, il semble difficile de blâmer les pessimistes. Et si les optimistes avaient raison, le problème serait simplement transmis dans son intégralité à nos enfants et à nos petits-enfants.

Le gaz naturel

Les alternatives au pétrole fossile sont ses « cousins », le gaz naturel (composé essentiellement de méthane) et le charbon. D'un point de vue purement économique ils sont des solutions palliatives. Le pétrole, en plus d'être plus facilement transportable, a un coût beaucoup plus faible d'extraction, même en termes d'énergie. Le pétrole a aussi une densité d'énergie beaucoup plus grande que le gaz, comme indiqué dans le tableau 4 : à température et pression ambiantes, le contenu énergétique d'un mètre cube de pétrole (34 GJ, soit environ 10 000 kWh) est mille fois plus plus élevé que celui d'un mètre cube de gaz. Cet inconvénient limite l'utilisation à grande échelle de gaz comme combustible.

Table 4: densité d'énergie des combustibles fossiles

Combustible	MJ/kg	MJ/m^3
charbon		
Anthracite	31-33	
bitume	20-29	
lignite	8-20	
tourbe	6-8	
pétrole brut	42-44	30 000-40 000

gaz naturel (température et pression ambiante)		29-39

À partir de ces données, il est clair que le pétrole est le combustible fossile par excellence, il est liquide, facile à transporter, il a une densité énergétique élevée. Le charbon et le gaz ne peuvent être que des solutions palliatives.

Les estimations actuelles de réserves suggèrent que le pic de production du gaz doit avoir lieu peu de temps après celui du pétrole, mais également avec une incertitude considérable. Au cours des dix dernières années, il y a eu une augmentation brutale de la consommation de gaz, principalement causée par le fait que les centrales au gaz de dernière génération en termes de délais de construction et de coûts sont très compétitifs avec d'autres technologies. Cela a créé de fortes tensions sur les marchés, parce que le gaz est aussi une matière première essentielle pour l'industrie chimique, qui l'utilise pour produire de grandes quantités de matériaux et de substances d'usage répandu : engrais, matières plastiques, médicaments, colorants, pesticides.

Le gaz naturel contribuera à résoudre les problèmes causés par le pic pétrolier, mais il n'y a aucune possibilité de remplacer l'« or noir » cela ne pourra donc pas durer très longtemps. Dans tous les cas à l'avenir il faudra choisir entre continuer à brûler du pétrole et du gaz pour obtenir de l'énergie ou les stocker en tant que matières premières pour l'industrie chimique.

Le charbon

Compte tenu de la diminution prévisible de la disponibilité du pétrole et du gaz pour les décennies à venir, l'attention s'est à nouveau tournée vers le charbon, dont on pensait jusqu'à il y a quelques années les réserves suffisantes pour quelques centaines d'années. En fait, le charbon facilement récupérable avec un rendement économique et un coût énergétique acceptables n'est pas si abondant. Selon des estimations fiables, le pic de production du charbon se situerait avant 2050.

En tout cas, même quand elle atteindra son apogée, la production de charbon devrait fournir une quantité d'énergie plus faible que ce qu'on obtient aujourd'hui avec le pétrole.

Le charbon a un contenu énergétique plus faible que le pétrole et ne peut être véhiculé que difficilement dans des canalisations, sauf sur de courtes distances. Comme il a été dit plus haut, le charbon est le plus sale des combustibles fossiles, c'est celui qui génère la plus grande quantité de gaz à effet de serre par unité d'énergie produite.

Le produit le plus échangé

Les réserves en combustibles fossiles ne sont pas réparties uniformément dans les diverses régions de la Terre et il en va de même pour la consommation. Le tableau 5 montre les dix pays les plus consommateurs d'énergie.

Table 5 : Les onze premiers consommateurs d'énergie primaire dans le Monde

	énergie totale Mtep (2008)	**% du total**	**per capita** tep (2006)
États-Unis	2299,0	20,4	13300
Chine	2002,5	17,7	2230
EU27	1728,2	15,3	8200
Russie	684,6	6,1	8487
Japon	507,5	4,5	7090
Inde	433,3	3,8	630
Canada	329,8	2,9	16900
Allemagne	311,1	2,8	7040
France	257,9	2,3	7200
Corée du Sud	240,0	2,1	7700
Brésil	228,1	2,0	960

Sources : BP Statistical review of world energy 2009,
US Energy Information Administration, International Energy Annual 2006
IEA, World Energy outlook 2009
Ministère de l'écologie..., Bulletin de la BEPH, bilan 2007

Les États-Unis, avec moins de 5% de la population mondiale, consomment plus d'un cinquième de l'énergie primaire mondiale dont le total en 2007 avoisinait les 12 Gtep. En Chine, au Brésil et encore plus en Inde la consommation d'énergie par habitant est encore très loin de celle des habitants du monde occidental, elle est encore modérée en France. La valeur de la consommation par personne est plus élevée au Canada, où le mode de vie énergivore nord-américain s'accompagne d'un climat particulièrement rude.

Les tableaux 6A, B, C montrent les dix plus grands pays et les dix plus gros consommateurs de pétrole, de gaz naturel et de charbon.

En plus du fait bien connu qu'une partie substantielle du pétrole est extrait au Moyen-Orient, il faut noter que les États-Unis qui sont le troisième plus grand producteur de pétrole et le second de gaz naturel et de charbon, en raison de leur énorme consommation d'énergie, sont obligés d'importer 65% du pétrole et 16% du gaz naturel qu'ils utilisent. Par contraste, la Russie est capable d'exporter des quantités énormes de pétrole, de gaz naturel et de charbon.

Nous notons également que l'Iran, se trouve impliqué dans les arcanes de la politique internationale depuis trente ans et, ce n'est probablement pas un hasard, il se trouve être aussi le quatrième producteur mondial de pétrole et de gaz naturel.

Table 6A : Dix premiers pays producteurs et consommateurs de pétrole + France en millions de tonnes par jour (2008)

	Production			**Consommation**
Arabie Saoudite	515,3		États-Unis	884,5

Russie	488,5		EU27	702,6
États-Unis	305,1		Chine	357,7
Iran	209,8		Japon	221,8
Chine	189,7		Inde	135,0
Mexique	157,4		Russie	130,4
Canada	156,7		Allemagne	118,3
Émirats Arabes Unis	139,5		Brésil	105,3
Venezuela	131,6		Arabie Saoudite	104,2
EU27	105,9		Corée du Sud	103,3
France	(2 0 0 7) 0,9		France	92,2

La production totale est aujourd'hui d'environ 85 millions de barils par jour et ne semble pas devoir augmenter de manière significative à court terme, cela entraîne l'augmentation des prix depuis 2003 et, pour certains, c'est un symptôme de l'arrivée au pic de production pétrolière dans le monde.

Table 6B : La production et la consommation de gaz naturel en milliards de mètres cubes par an (2008)

	Production		**Consommation**
Russie	601,7	États-Unis	657,2
États-Unis	582,2	UE27	490,1
UE27	190,3	Russie	420,2
Canada	175,2	Iran	117,6
Iran	116,3	Canada	100,0
Norvège	99,2	Grande Bretagne	93,9
Algérie	86,5	Japon	93,7
Arabie Saoudite	78,1	Allemagne	82,0
Qatar	76,6	Chine	80,7
Chine	76,1	Arabie Saoudite	78,1
France (2007)	1,7	France	44,2

La production nationale décline rapidement avec l'épuisement du gisement de Lacq. Curieusement l'Iran, un des plus gros producteurs du monde, peine à satisfaire sa demande intérieure. Les États-Unis ont une production énorme, qui reste insuffisante pour couvrir leur propre consommation. Parmi les « cheiks du gaz naturel » on trouve aujourd'hui la Norvège, avec une production 22 fois supérieure à sa demande intérieure et qui est un exportateur majeur, en Europe continentale.

Table 6C : La production et la consommation de charbon en million de tep / an

	Production		**Consommation**
Chine	1414,5	Chine	1406,3

États-Unis	596,9	États-Unis	565,0
Australie	219,9	UE27	501,2
Inde	194,3	Inde	231,4
EU27	171,5	Japon	128,7
Russie	152,8	Afrique du Sud	102,8
Afrique du Sud	141,1	Russie	101,3
Indonésie	141,1	Allemagne	80,9
Pologne	60,5	Corée du Sud	66,1
Kazakhstan	58,8	Pologne	59,4
France	0,1	France	11,9

La consommation chinoise de charbon est impressionnante, et même après les « accords de Copenhague » n'est pas liée par des accords internationaux sur les changements climatiques qui l'obligerait à réduire ses émissions de dioxyde de carbone.

Les tableaux 6 montrent également que les pays les plus peuplés, la Chine et l'Inde produisent déjà moins globalement que ce qu'ils ne consomment. Le Japon n'apparaît jamais dans les dix premiers pays producteurs mais il est toujours parmi les dix premiers pays consommateurs. Les pays riches de l'Occident, à l'exception du Canada, consomment plus qu'ils ne produisent.

Notre pays dispose de très peu de réserves de combustibles fossiles, nous importons pratiquement tout le gaz et le pétrole que nous consommons. Notre consommation de charbon est une des plus faibles des pays occidentaux.

Qui n'a pas de combustibles fossiles, ou n'en possède pas assez, doit les acheter à ceux qui les produisent. Le pétrole est en fait le produit le plus échangé dans le commerce mondial. On estime qu'au prix actuel, les opérations financières relatives au pétrole sont chaque jour supérieures à dix milliards de dollars.

Enfin, il est important de souligner que les niveaux de consommation dans les pays producteurs augmentent très rapidement, de sorte que leur capacité d'exportation va diminuer. Par exemple, on estime que d'ici dix ans, la Russie va commencer à réduire sensiblement ses exportations de gaz.

Le trésor caché

Les réserves de pétrole les plus importantes sont détenues par les pays du Moyen-Orient, comme le montre le tableau 7A. Pour le gaz, la Russie est la nation avec les plus grandes réserves, qui à elles seules représentent plus d'un quart du total. (Tableau 7B).

Près de 60% des réserves de gaz sont détenues par seulement trois pays, l'un d'entre eux, le Qatar, n'est pas plus grand que la région Île-de-France. 40% du gaz mondial est extrait de moins de 20 gisements, ce qui rend la situation de l'approvisionnement extrêmement délicate.

Les réserves de charbon sont réparties entre un plus grand nombre de pays et, curieusement, il existe aussi d'importantes réserves au Moyen-Orient, comme le montre le tableau 7C.

Les réserves disponibles sont toujours difficiles à connaître en détail, non pas pour des raisons techniques mais parce qu'il n'est souvent pas dans l'intérêt des grandes sociétés d'énergie et des États de fournir des chiffres précis. Souvent, même, les raisons de masquer les valeurs sont contradictoires.

Par exemple, dans l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) les quotas de production et de vente sont fixés en fonction des réserves divulguées. Les pays membres ont donc tout intérêt à sur-évaluer leurs réserves pour pouvoir vendre plus et encaisser de plus grands bénéfices immédiats.

Cela pourrait être la raison pour laquelle en 2001, le Qatar a réévalué son stock de 4 milliards à 13 milliards de barils et en 2004, l'Iran a annoncé une augmentation de 40% de ses réserves, ce qui lui a permis de dépasser l'Iraq, et de prendre la deuxième place dans le classement mondial. En revanche, la même année, la Royal-Dutch Shell, l'une des plus grandes compagnies pétrolières au monde, après la divulgation de certains documents confidentiels a dû admettre que ses réserves de pétrole étaient de 20% inférieures à ce qu'elle annonçait précédemment (3,9 milliards de barils) ; dans les mois suivants elle a diminué ses réserves d'encore 6 milliards de barils supplémentaires.

Table 7A : Les réserves de pétrole en milliards de barils

Arabie Saoudite	264,2	21,3%
Iran	138,4	11,2%
Irak	115,0	9,3%
Koweit	101,5	8,2%
Émirats Arabes Unis	97,8	7,9%
Vénézuéla	87,0	7,0%
Russie	79,4	6,4%
Lybie	41,5	3,3%
Kazakhstan	38,9	3,2%
Nigeria	36,2	2,9%
UE27	6,3	0,5%

Les cinq premiers pays, détenant 60% des réserves mondiales, se trouvent tous dans le golfe Persique. Certaines statistiques commencent à comptabiliser les données des réserves canadiennes de pétrole « non conventionnel » obtenu à partir des sables bitumineux de l'Alberta. Les estimations les plus récents parlent de 152,2 milliards de barils, ce qui ferait du Canada le deuxième titulaire de réserves de pétrole du monde. Ces schistes et sables bitumineux ne sont pas encore systématiquement comptabilisés dans les statistiques car ils sont plus difficiles à extraire du sol. En les comptabilisant on élève les réserves à environ 2800 milliards de barils dans le monde entier (plus de 2000 milliards aux Etats-Unis seulement). Il convient de souligner que la possibilité d'obtenir des quantités importantes de pétrole d'une manière industrielle de ces sources non

conventionnelles reste à démontrer.

Table 7B : Les réserves de gaz naturel en milliards de m^3

Russie	44 650	25,2%
Iran	27 800	15,7%
Qatar	25 600	14,4%
Arabie Saoudite	7 170	4,0%
Émirats Arabes Unis	6 090	3,4%
États-Unis	5 980	3,4%
Nigeria	5 300	3,0%
Venezuela	5 150	2,9%
Algeria	4 520	2,5%
Iraq	3 170	1,8%
UE27	2 870	1,6%

Près de 60% des réserves de gaz sont détenues par seulement trois pays. Près de la moitié de la production provient de moins de 20 gisements gigantesques, chacun contrôlé par une poignée de soldats. Le gaz est donc la ressource fossile la plus sensible du point de vue géopolitique. Ce n'est pas un hasard si la Russie et l'Iran sont de plus en plus présents dans les journaux télévisés !

Table 7C : Les réserves de charbon en millions de tonnes

États-Unis	242 721	28,6%
Russie	157 010	18,5%
Chine	114 500	3,5%
Australie	76 600	9,0%
Inde	56 498	6,7%
Afrique du Sud	40 000	5,7%
Ukraine	33 873	4,0%
Kazaskhstan	31 300	3,7%
UE27	29 570	3,6%
Pologne	7 502	0,9%
Brésil	7 068	0,8%

Les trois premiers pays qui détiennent ensemble plus de 60% des réserves de charbon sont aussi les trois consommateurs principaux d'énergie primaire (tableau 5). Une augmentation massive de l'utilisation de cette ressource « domestique » par ces pays pour compenser la disponibilité décroissante de pétrole et de gaz, aurait des effets dévastateurs sur la stabilité du climat mondial.

Source : BP Statistical Review of World Energy, Juin 2008, pratiquement inchangée en juin 2009

Même l'énergie voyage

La question de l'utilisation de combustibles fossiles est rendu encore plus complexe par le fait que 60% de la production mondiale est destinée à la consommation en des lieux éloignés des gisements.

Quand la topographie le permet, un réseau dense d'oléoduc et de gazoduc assure le transport des lieux de production aux consommateurs. S'ajoutant à ceux qui sillonnent l'Europe va s'ajouter dans les années à venir un pipeline de 900 km qui, via la Sardaigne, apportera le gaz algérien à Piombino, en face de l'île d'Elbe. Bon nombre des pipelines utilisés aujourd'hui ont plus de 15 ans, un âge auquel ils ne peuvent plus être considérées comme totalement sûrs. La situation est particulièrement dangereuse en Alaska, où le réchauffement climatique fait fondre la couche de sol gelé (pergélisol) qui suporte l'un des principaux oléoducs dans le monde.

Pour les trajets plus longs le gaz est transporté sur des navires pétroliers et des transporteurs de gaz naturel liquéfié (GNL) qu'on appelle méthaniers. Cela implique une forte densité de flux d'énergie dans les zones géographiques sensibles telles que le détroit d'Ormuz. Ce détroit est un point de passage obligé sur la route du pétrole du Golfe Persique à travers lequel passe une quantité de pétrole brut égal à la consommation annuelle de l'Europe. Le détroit de Malacca, voit passer 80% du pétrole pour la Corée du Sud et le Japon et plus de 50% de celui destiné à la Chine.

Le transport du pétrole par mer utilise des pétroliers géants qui peuvent avoir une capacité supérieure à 300 000 tonnes et sont très chers parce qu'ils doivent se conformer à des règles strictes pour éviter que ne se renouvellent les accidents environnementaux catastrophiques qui ont eu lieu dans le passé.

Pour le transport par bateau, le gaz doit être liquéfié à une température de -162 ° C dans le port de départ, puis regazéifié dans le port d'arrivée. Ces opérations, techniquement complexes, coûteuses en termes de développement économique et d'énergie sont aussi potentiellement dangereuses.

Les États-Unis, géographiquement éloignés des grands centres producteurs du Moyen-Orient, doivent accorder dans leur approvisionnement maritime une attention accrue aux producteurs plus proches du continent américain tels que le Venezuela et la Bolivie, où l'offre de pétrole et de gaz aux États-Unis est l'une des questions politiques les plus débattues.

L'Europe a des réserves de combustibles fossiles très limitées, mais du point de vue de l'offre elle est dans une situation géographique beaucoup plus favorable que celle des États-Unis, car elle est entourée par les principales réserves de la production mondiale : la Russie, le Moyen Orient, l'Afrique du Nord, la Mer du Nord.

Il est important de posséder un contrôle des gisements, mais il est aussi important de contrôler la façon dont les combustibles fossiles sont distribués. Nous sommes très conscient de ce point en Europe depuis qu'au début de 2006, le flux de gaz de

la Russie a été réduit pendant quelques semaines en raison de prélèvements non planifiés, pratiqués par l'Ukraine sur le pipeline de gaz naturel qui la traverse. Pour ces raisons, les tracés des autoroutes de l'énergie sont aussi souvent sélectionnés plus sur la base de critères politiques que sur la recherche d'une distance minimale.

Une addition salée

La consommation de combustibles fossiles a atteint des niveaux très élevés (tableau 6) et l'utilisation de cette source pratique et puissante d'énergie va certainement encore augmenter dans les années à venir.

Selon les lois du marché une demande accrue à production constante ou en déclin a fait augmenter le prix du pétrole au delà de 50 $ le baril à l'automne 2004, puis 100 $ en Janvier 2008, et les 150 $ ont été atteint en Juillet 2008. Le retour actuel aux alentour de 80 $ n'est certainement qu'une pause dans une hausse inéluctable.

D'autres facteurs sont susceptibles de faire encore monter le prix du pétrole. Les premiers investissements dans les forages pétroliers produisaient des rendements fabuleux, parce qu'il n'était pas nécessaire de creuser des puits profonds pour que le pétrole coule en abondance. Avec de temps, cependant, l'exploration et l'exploitation de nouvelles réserves a nécessité des investissements toujours croissants et la fraction de pétrole restant dans les puits s'est avérée être de moins bonne qualité.

Un autre facteur négatif est la concentration des gisements dans quelques pays, dont beaucoup sont politiquement instables. Enfin, les récentes guerres et le terrorisme international, en partie créés et entretenus par la distribution inéquitable des ressources de la planète, sont cause de doute sur la possibilité d'avoir un approvisionnement sûr et continu en ressources pétrolières. En conséquence chaque pays a tendance dès qu'il le peut à accumuler des réserves. Le pétrole est désormais un « bien de dernier recours », comme l'or, de sorte que les grandes banques internationales investissent dedans, créant leurs propres réserves privées et déclenchant une spéculation nuisible.

Les politiciens semblent l'ignorer, sous-estimer, voire masquer le problème des nouvelles hausses inévitables du prix du pétrole parce qu'ils pensent que c'est contre-productif pour leur réélection, que de transmettre à leurs électeurs un message préoccupant qui explique en détail les causes de cette tendance.

Enfin, il convient d'ajouter que le prix du pétrole et de l'énergie en général, reflète quand même le coût réel de production même si le secteur énergétique reçoit partout, des subventions publiques qui relèvent d'accords économiques qui ont peu à voir avec les coûts techniques de l'énergie. Il faut aussi compter dans le prix les énormes dépenses qu'engagent de nombreux États, en particulier les riches, pour maintenir le flux du pétrole, du gaz et du charbon sous la forme de déploiements militaires, de financement d'états « amis », modérés, d'ingérence dans la politique intérieure des pays producteurs etc.

L'appareil militaire déployé dans le golfe Persique, l'océan Indien et la Méditerranée à la garde du corridor énergétique moyen-oriental a un coût astronomique. Lorsque cette machine militaire entre en action, les coûts explosent. On estime que les dépenses totales pour la première guerre du Golf avait presque atteint 200 milliards de dollars, et que la guerre en Irak qui a débuté en 2003 a eu un coût de 3000 milliards de dollars pour les États-Unis et autant pour le reste du monde.

Avec ces considérations, nous avons voulu donner une idée du fait que personne probablement dans le monde ne sait précisément estimer le vrai prix du baril de pétrole.

Alliances, tensions, guerres

Il est évident que dans une telle situation, la course à l'approvisionnement énergétique affecte fortement la politique des pays producteurs, qui ont un intérêt à vendre, et celle des pays consommateurs dont l'économie et la stabilité sociale s'effondrerait sans la disponibilité de combustibles fossiles. C'est la raison des alliances stratégiques et militaires, telle que celle entre les États-Unis et l'Arabie saoudite, et la course de nombreux pays consommateurs, notamment la Chine et l'Inde, à la conclusion d'accords bilatéraux avec certains pays tels que les producteurs récents comme l'Angola. Et là aussi se trouve la raison de tensions qui peuvent conduire à des guerres.

Il est franchement difficile de croire que les guerres en Irak, en Afghanistan, en Tchétchénie et en Serbie, régions souvent totalement inhospitalières en termes de ressources, ne sont pas connectés à un contrôle de proximité des puits de pétrole et de gaz dans le golfe Persique et la mer Caspienne ainsi que des routes sur terre et sur mer. Aux États-Unis, qui importent des quantités énormes de pétrole des pays arabes, de nombreux automobilistes ont l'impression en faisant le plein d'essence de financer en même temps le terrorisme et l'antiterrorisme.

Perdant les guerres pour le pétrole l'environnement est toujours perdant. Ainsi, durant la guerre du Golfe de 1991, 730 puits de pétrole ont été dynamités, dont beaucoup ont brûlé pendant plusieurs mois, avec une perte d'environ 240 millions de litres de pétrole brut, équivalant à environ 2% des réserves du Koweït. La production de polluants atmosphériques provenant de la combustion incontrôlée du pétrole a été gigantesque. Et pendant cette guerre, 1,7 milliards de litres de pétrole se sont retrouvés dans la mer du golfe Persique.

CHAPITRE 5

Dommages collatéraux

Vous ne pourrez jamais avoir assez de ce dont vous n'avez pas besoin,
pour être heureux.
Eric Hoffer

Il est connu, bien qu'on l'oublie le plus souvent, que chaque fois qu'on utilise une ressource on crée inévitablement des déchets. D'une manière ou d'une autre les déchets ne sont jamais « innocents » et plus ils sont nombreux plus ils sont nuisibles.

Dans les dernières décennies, nous avons réalisé, avec une préoccupation croissante, que l'utilisation de combustibles fossiles produit des substances gazeuses nocives pour la santé humaine et nuisible à l'environnement et à la stabilité climatique.

L'effet de ces polluants ne se limite pas aux lieux où ils sont produits, mais elle s'étend à l'échelle mondiale, donnant ainsi tout son sens à l'attitude PCM (pas chez moi) trop souvent prise par les individus, les communautés et les nations qui aspirent à s'en tirer sans dommage pour leur territoire restreint. Au lieu de cela, on pourrait se dire que l'environnement est un atout mondial et que sa préservation nécessite une action aux deux échelles locale et mondiale, et à court et à long terme.

L'histoire des dernières décennies a également montré que des préjudice graves pour l'homme et l'environnement peuvent être causés par des phénomènes imprévus et des processus qu'on aurait eu tendance à considérer comme négligeables. Un bon exemple classique est le fameux « trou d'ozone » causé par les chlorofluorocarbones, des gaz utilisés en quantité limité, mais qui ont été capables de détruire la couche d'ozone stratosphérique qui nous protège du rayonnement ultraviolet solaire.

Ceci suggère qu'il faut d'une part faire preuve d'un maximum de prudence dans le largage de déchets dans l'air, l'eau et le sol, et qu'il est d'autre part nécessaire d'exercer une surveillance généralisée et continue de la situation et de procéder à des analyses scientifiques précises des données collectées.

Les nations développées, sous l'influence de leur opinion publique et grâce au progrès technologique, ont tendance à réduire les émissions de substances nocives et voudraient imposer leurs normes environnementales aux pays en développement. Mais ceux-ci ne peuvent pas assumer les coûts nécessaires pour contrôler et limiter la pollution qui risqueraient de faire perdre leur compétitivité à leurs produits, pensons à la Chine.

Bien sûr, la pollution de la planète est susceptible d'augmenter aussi, parce que

les pays développés eux mêmes refusent souvent de se conformer aux normes anti-pollution qui risqueraient de désavantager leur système de production, pensons aux États-Unis.

L'astronef surchauffe

Environ un quart du rayonnement solaire qui frappe la Terre est réfléchi vers l'espace par les nuages, un autre quart est absorbé par l'atmosphère et se transforme en chaleur. La moitié restante de l'énergie solaire atteint la surface de la Terre. 90% en est absorbée et réchauffe le sol et les mers, tandis que 10% est réfléchi, par exemple, par les calottes polaires.

Certains gaz tels que la vapeur d'eau (H2O), le méthane (CH4) et le dioxyde de carbone (CO2) sont transparents aux rayons du Soleil qui chauffent le sol mais ils absorbent le rayonnement infra-rouge que la surface de la Terre rayonne dans l'atmosphère en retour de ce chauffage. En pratique, ces gaz provoquent un effet de serre en permettant à la lumière du soleil d'entrer et en empêchant la chaleur de quitter l'atmosphère.

S'il n'y avait pas de gaz à effet de serre naturel dans l'atmosphère la température de la surface du globe serait d'environ 30 ° C inférieure à celle dont nous jouissons aujourd'hui. Une certaine dose en est donc indispensable et a donc probablement favorisée le développement de la vie sur Terre.

Depuis qu'elle a commencé à utiliser intensément les combustibles fossiles, l'humanité a déversé dans l'atmosphère des quantités croissantes de gaz à effet de serre produits par ses activités, notamment le CO_2, modifiant ainsi le climat de la Terre. Voyons comment cela se produit.

Les combustibles fossiles se sont formés dans le sol, en l'absence d'oxygène, à la suite de la transformation de résidus organiques de plantes et d'animaux par des réactions chimiques complexes au cours de centaines de millions d'années. Les combustibles fossiles sont donc en fait de l'énergie solaire stockée sous la forme de liaisons chimiques entre les atomes de carbone (C-C) et entre le carbone et d'hydrogène (C-H) !

Quand nous extrayons les combustibles fossiles du sol et que nous les faisons réagir (brûler) avec l'oxygène de l'air, les liaisons chimiques C-C et C-H sont rompues et il s'en forme d'autres C-O et H-O.

Ces modifications chimiques conduisent à la libération de grandes quantités d'énergie et à la formation de dioxyde de carbone et d'eau. Plus précisément, 1 g de charbon développe une quantité de chaleur égale à 32,8 kJ et produit 3,66 g de dioxyde de carbone (la masse augmente parce que le carbone se combine avec l'oxygène de l'air qui est plus massique que lui).

Pétrole et gaz naturel sont des mélanges d'hydrocarbures, c'est à dire des composés du carbone et de l'hydrogène. Les hydrocarbures sont gazeux, liquide ou solide en fonction du nombre d'atomes de carbone dans leurs molécules.

L'essence issue de la distillation du pétrole, est un mélange d'hydrocarbures liquides, de formule approximative : C_8H_{18}, qui réagit avec l'oxygène et se transforme en eau et en dioxyde de carbone : 1 g d'essence libère une quantité de chaleur égale à environ 47,8 kJ et produit environ 3,08 g de CO_2.

Le gaz naturel est essentiellement composé de méthane, CH_4, qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et du dioxyde de carbone : 1 g de méthane libère en brûlant une quantité de chaleur égale à 55,6 kJ et produit 2,74 g de dioxyde de carbone. Ainsi, l'utilisation du charbon, du pétrole et du gaz naturel pour la production d'énergie produit une quantité de CO_2 égale à environ trois fois leur poids.

Au rythme actuel, l'humanité produit chaque année et rejette dans l'atmosphère environ 30 milliards de tonnes de dioxyde de carbone. Les principaux producteurs de ces polluants sont les États-Unis, l'Europe, le Japon et la Chine. Un citoyen américain, produit en une année environ 20 tonnes de CO_2, soit près de trois fois la quantité produite par un citoyen européen, qui à son tour produit 7 fois plus qu'un citoyen indien. La quantité de CO_2 rejetée dans l'atmosphère de l'Italie est environ 100 fois supérieure à celle rejetée en Éthiopie, qui a une population comparable.

À cause de l'utilisation des combustibles fossiles depuis la révolution industrielle, la concentration actuelle de CO_2 dans l'atmosphère a augmenté, passant de 275 à environ 400 parties par million (ppm) et il est prévu que si aucune mesure appropriée n'est prise, elle dépassera 550 ppm d'ici la fin du XXI^{e} siècle.

Les conséquences de l'augmentation de la concentration de CO2 dans l'atmosphère, que certains ont appelé « une expérience dangereuse hors de contrôle » pourraient être désastreuses. Il est prévu que le doublement de la concentration en CO2 causerait une augmentation de la température moyenne mondiale d'environ 3 ° C accompagnée d'une hausse du niveau des mers et la fréquence accrue de phénomènes météorologiques extrêmes comme des vagues de chaleur et de fortes pluies.

Le fait que les pays très pauvres sont plus vulnérables au changement climatique est un facteur aggravant qui est tout à fait illustré, par exemple, par la différence du nombre de victimes et de l'étendue des dommages que les ouragans provoquent en Haïti ou aux États-Unis. Ainsi en 2008 les ouragans ont provoqués la mort de 800 personnes à Haïti et de seulement 7 aux États Unis.

Accord et désaccord

Les premières données scientifiques sur l'augmentation de la concentration de CO2 dans l'atmosphère remontent à 1957, mais seulement 31 ans plus tard, le problème de sa mesure a été résolu par l'Organisation des Nations Unies en

mettant en place un organe spécial, l'IPCC (International Panel on Climate Change) qui s'appuie sur les travaux du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur Évolution du Climat).

En 1992, lors de la conférence de Rio de Janeiro, le GIEC a produit un accord prévoyant des mesures spécifiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce protocole a ensuite été modifié et adopté à Kyoto en 1997. Les pays membres ont convenu de réduire d'ici 2012 les émissions de gaz à effet de serre d'un pourcentage compris entre 5 et 10% par rapport à 1990. L'accord est resté bloqué pendant longtemps à cause du défaut de ratification du protocole par les États-Unis, l'Australie et la Russie, puis il est entré en vigueur après sa ratification par la Russie le 30 Septembre 2004.

Malheureusement, le Protocole de Kyoto, même s'il est effectivement appliqué, n'aura pas d'impact important en partie à cause de l'absence d'adhésion des États-Unis, qui sont les principaux producteurs de CO_2, et plus encore à cause de la modestie des objectifs fixés.

Ces dernières années, en particulier aux Etats-Unis, il y avait une action intense de la part de certains instituts scientifiques, subventionnés par le lobby des pétroliers, pour jeter le doute sur le réchauffement planétaire. Mais le rapport du GIEC en Février 2007 a confirmé l'augmentation des températures de la surface du globe, la fonte des glaciers et l'élévation du niveau de la mer (figure 7) et dit que tout cela est causé - avec une probabilité supérieure à 90% - par les activités humaines.

Pour ses activités précieuses, le GIEC a reçu le Prix Nobel 2007 avec l'ancien Vice President américain Al Gore, auteur du documentaire « Une vérité qui Dérange », consacré aux changements climatiques.

La Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques tenue à Bali en décembre 2007, elle a publié un compromis en vertu duquel les 187 nations présentes, y compris les États-Unis, se sont engagées à négocier dans les deux ans un nouvel accord pour remplacer le Protocole de Kyoto à la fin de l'année 2012 et contenant des règles obligatoires pour tous les pays.

Cette conférence sur le climat a eu lieu à Copenhague à la fin de l'année 2009. Elle a vu entrer la Chine dans l'équation du climat comme gros producteur de CO2 et les États Unis convenir enfin de la réalité de l'origine anthropique du réchauffement global. Cependant aucun accord contraignant avec des objectifs chiffrés n'a pu être signé.

Figure 7. La couverture de la revue Science du 24 Mars, 2006, qui appelle à « briser la glace » et à accepter les preuves du réchauffement de la planète dû à l'utilisation généralisée des combustibles fossiles.

Incarcérer le coupable?

Environ 30% des émissions du dioxyde de carbone (CO2) responsable de l'effet de serre résultent de l'utilisation du charbon. Aux États-Unis actuellement 1500 centrales électriques au charbon sont en opération, en Chine une centrale au charbon est inaugurée chaque semaine. À partir de ces faits et comme le charbon est le combustible fossile le plus abondant, l'idée à pris forme d'essayer de construire des centrales n'émettant pas de CO2. Pour cela, il faudra pouvoir « capturer » le dioxyde de carbone produit par la combustion du charbon avant qu'il ne soit libéré dans l'atmosphère.

Au moins une douzaine de techniques différentes ont été proposées à cet effet, la plus prometteuse consiste à capturer le dioxyde de carbone et à l'emprisonner dans des cavités souterraines, en particulier dans les puits de pétrole ou de gaz épuisés. Les évaluations théoriques sont encourageants, et les recherches en cours semblent donner des résultats satisfaisants, mais qui viennent tout juste de passer du laboratoire à l'usine pilote.

Du point de vue technique il s'agit de séparer le CO_2 des gaz d'échappement, de le compresser et de le transporter par gazoduc jusqu'à l'endroit du dépôt. Pour la première phase, qui est la plus compliquée, on a proposé différentes solutions. Il semble qu'il est également possible de convertir les anciennes installations d'extraction avec les changements appropriés, mais certains font valoir que ces changements seraient plus chers que la construction d'une nouvelle installation.

Dans tous les cas, la capture du dioxyde de carbone augmentera le coût de l'électricité produite à partir du charbon pour l'utilisateur final, les estimations de l'augmentation varient de 20 à 80%. Un autre aspect critique de ces technologies est la possibilité réelle d'un retour du CO_2 dans l'atmosphère à cause de fuites par les failles du terrain d'enfouissement. Ces fuites sont très difficilement prévisibles avec les technologie disponibles actuellement.

Enfin, il ne faut pas sous-estimer la possibilité d'accidents. Par exemple, comme il

est plus lourd que l'air, la fuite de grandes quantités de CO_2 de ses couches de stockage, peut causer des dommages graves pour les populations comme cela s'est produit à la suite de l'éruption de 80 millions de mètres cubes de CO_2 à partir du lac Nyos au Cameroun, qui en 1986 a tué 1800 personnes.

À propos de l'investissement dans cette technologie, peut-être faut-il réfléchir à ce qu'a écrit récemment John Turner, du National Renewable Energy Laboratory des États-Unis (le laboratoire des énergies renouvelables). « Bien que de grandes quantités d'argent, d'intelligence et d'énergie soit investies dans les technologies pour la la séquestration du CO_2, il reste une question ouverte : est-ce la meilleure façon de dépenser nos ressources énergétiques et financières limitées ? Le simple fait de posséder d'importantes réserves de charbon ne signifie pas que nous devions l'utiliser. Le point n'est-il pas de laisser ces ressources dans le sous-sol et de décider pour quelque chose de plus avancé. ».

Un danger subtile

L'utilisation de combustibles fossiles, en plus de libérer du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, relâche également un grand nombre de substances nocives pour la santé. Cela se produit pour deux raisons.

La première est que dans tous les dépôts les combustibles fossiles sont toujours mélangés avec des quantités plus ou moins importantes de matières de toutes sortes, des composés du soufre, des métaux, des hydrocarbures lourds et des composés aromatiques, qui ne sont que partiellement séparés du combustible avant l'utilisation. La quasi-totalité de ces substances et leurs produits dérivés tels que les poussières fines, sont dangereux pour la santé humaine. Généralement, le charbon est plus « sale » que le pétrole, qui à son tour, est plus « sale » que le gaz naturel, mais la composition chimique et la quantité d'impuretés contenues dans un combustible fossile varient selon sa provenance.

La deuxième raison, comme il a déjà été dit plus haut, tient au fait que les combustions se produisant dans les moteurs à combustion et les chaudières n'utilisent pas de l'oxygène pur comme comburant, mais l'air. Aux températures élevées qui caractérisent les combustions, l'azote et l'oxygène de l'air se combinent pour donner des oxydes d'azote NO_x, qui sont eux-mêmes des gaz polluants et des précurseurs d'autres substances extrêmement nocives telles que l'ozone et des particules polluantes.

Actuellement, la recherche scientifique est focalisée sur les effets nocifs des particules atmosphériques. Ces effets dépendent de la composition chimique des particules et sont d'autant plus dangereux que les particules sont petites. Celles qui ont un diamètre compris entre 10 et 2,5 microns (PM10) pénètrent dans les bronches et les bronchioles, celles de plus faible diamètre (PM2,5) pénètrent les alvéoles et peuvent passer directement dans le sang.

Il existe des preuves solides qui lient l'exposition aux particules de pollution atmosphérique aux maladies respiratoires et cardio-vasculaire (figure 8). Des effets

mutagènes ont été observés chez le rat. L'exposition constante aux particules conduit à un état d'inflammation chronique et l'inflammation des tissus produit un terrain favorable au processus de cancérogenèse.

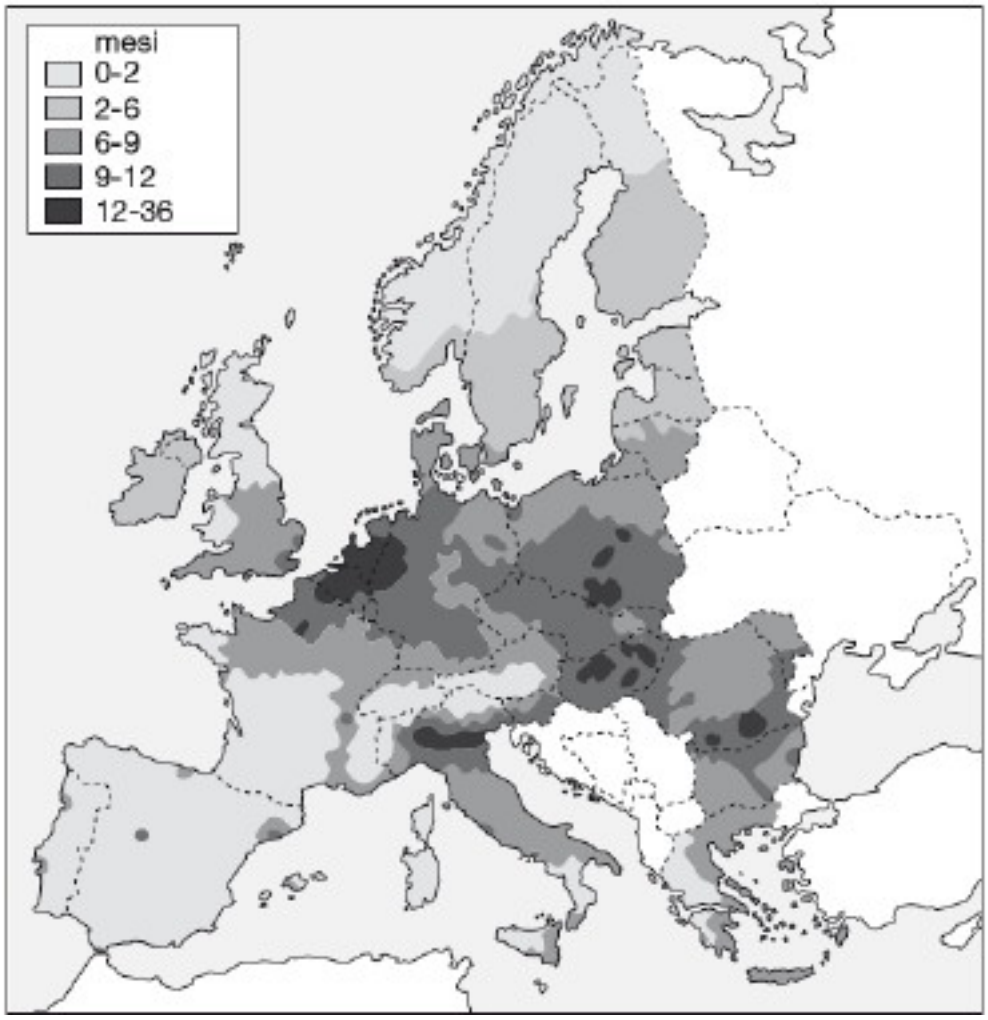


Figure 8. La pollution de l'air par des particules fines produites par l'utilisation de combustibles fossiles, nuit à la santé. Cette carte de l'Europe montre la réduction de la durée de vie moyenne (en mois) dues à l'exposition aux PM2,5.
Source : Commission européenne, DG Environnement, 2005

Les oxydes d'azote et de soufre, en plus d'être nuisibles à la santé en tant que tel, interagissent avec d'autres produits chimiques présents dans l'atmosphère, se transformant en poussières et en particules ultrafines (particules secondaires).

L'ozone est un polluant secondaire, produit dans l'atmosphère à partir de polluants primaires par l'action de la lumière, sa présence dans l'air est très dangereux pour les animaux et les plantes. Les métaux lourds peuvent être cancérigènes, mutagènes et tératogènes.

Même la pluie n'est plus ce qu'elle était

Depuis la fin des années soixante il a été remarqué que dans certaines régions du

globe, en particulier dans les zones situées sous le vent des zones fortement industrialisées, les précipitations et le brouillard avait un degré élevé d'acidité. Ce phénomène est dû à la présence dans l'atmosphère d'acides forts comme l'acide nitrique et d'acide sulfurique.

L'acide nitrique (HNO_3) est engendré directement ou indirectement par une réaction chimique entre l'eau (pluie, brouillard) et des oxydes d'azote NO_x produits par les combustions. Les convertisseurs catalytiques des voitures transforment les NO_x en azote (N_2) et oxygène (O_2) pour limiter les rejets de NO_x dans l'atmosphère*.

** Pour l'instant, ce processus de réduction chimique ne peut être atteint qu'en utilisant des composés du rhodium comme catalyseurs. La disponibilité de ces métaux rares et précieux sur les marchés mondiaux s'est effondrée en raison de la croissance continue de la production automobile. En Mars 2008, le prix de l'or a atteint un maximum de 1000 $ l'once, causant l'émoi des marchés alors que dans le même temps le prix du rhodium atteint environ 9100 $ l'once sans que cela ne soit évoqué.*

Cette technologie catalytique, tout comme les technologies récentes des moteurs, ont permis de réduire les émissions polluantes des voitures de façon spectaculaire. On pourrait également équiper de catalyseurs les centrales thermiques, mais cette pratique dispendieuse n'est pas encore suffisamment répandue.

L'acide sulfurique (H_2SO_4) est engendré à partir du soufre, qui figure comme une impureté dans tous les combustibles fossiles. Réagissant avec l'oxygène, le soufre crée le dioxyde de soufre (SO_2) qui se transforme ensuite en trioxyde de soufre (SO_3), qui en s'associant à l'eau forme l'acide sulfurique. Cet acide est particulièrement préjudiciable car ils prive le sol d'ions calcium, qui sont essentiels pour la croissance végétale, en formant du sulfate de calcium insoluble.

Les pluies acides modifient donc profondément les propriétés chimiques des sols et des eaux douces et peuvent causer des dommages plus ou moins sévères. Dans certains cas, cela peut aller jusqu'à la déforestation et à la disparition, dans certaines zones, de toute vie dans les lacs.

La pluie acide est également préjudiciable à l'intégrité des monuments et des bâtiments, en particulier ceux qui sont construits en matériaux qui sont riches en carbonate de calcium, comme le marbre et le travertin.

Au cours des vingt dernières années, le problème des pluies acides a été considérablement réduit dans les pays occidentaux et le Japon, mais il s'aggrave dans les pays en développement et en Chine.

Une obole pour compenser

L'externalité** est définie comme une situation où les coûts ou les avantages privés

attachés à l'utilisation d'un bien ou d'un service diffèrent des coûts ou des avantages qui reviennent à la collectivité. Un exemple classique d'externalité est la pollution qui est produite par un petit nombre de personnes, mais touche généralement un nombre beaucoup plus grand d'individus.

**http://fr.wikipedia.org/wiki/Externalité

Les dommages que provoquent l'utilisation de combustibles fossiles sur la santé humaine et l'environnement sont donc des externalités : leur coût économique n'est habituellement pas pris en compte par les producteurs et les consommateurs d'énergie, mais tombe sur la communauté.

Récemment, toutefois, certaines institutions nationales et internationales ont commencé à évaluer l'étendue des dégâts en termes économiques, même si le problème est extrêmement complexe et s'il n'existe pas de consensus sur les paramètres sur lesquels fonder ces évaluations.

Par exemple, une turbine à gaz à cycle combiné de 800 MW, qui est l'une des moins polluantes pour produire de l'électricité, produit 1600 tonnes / an d'oxydes d'azote et 60 tonnes / an de PM2,5 (estimation prudente). Le coût extérieur assumé par les systèmes de santé, lié aux traitements qui sont nécessaires à la population, peut être estimé à 12 millions d'euros par an pour cette centrale. En prenant l'exemple de l'Italie, ce chiffre doit être comparé à la contribution compensatoire que le propriétaire de l'usine doit payer à l'administration locale en cause de 0,2 € par MWh, ce qui équivaut à 1,4 millions d'euros par an. Encore cette contribution n'est-elle pas destinée à rembourser les frais de santé extérieure, mais est due pour défaut d'utilisation alternative des terres et pour l'impact logistique des sites.

En tout cas, la compagnie productrice paye seulement environ un dixième du dommage causé à la collectivité. Cette obole, que les administrateurs locaux considèrent comme une grosse affaire, est bien sûr au profit de la collectivité dans son ensemble, mais elle sera utilisé pour faire une petite intervention urbaine ou culturelle : une route d'asphalte ou un festival de la chanson.

En France, pensons à la taxation sur les carburants, la fameuse TIPP (Taxe Intérieure sur les produits Pétroliers), qui pour l'essence sans plomb à taux d'octane 95 représente 63% du prix du carburant. Cette taxe rapporte à l'état environ 25 milliards d'euros. En 2009, le déficit de la Sécurité Sociale en France a été de 13 milliards d'euros sans que la TIPP ne contribue à le combler.

Une approche beaucoup plus rigoureuse pour ce que l'on appelle des mécanismes de compensation est possible : aux Etats-Unis, en Californie, il existe une législation beaucoup plus avancée qui fixe un plafond aux émissions. Les législations européennes elles-mêmes sont plus rigoureuses que l'américaine ou que celles des autres pays du monde ; cette rigueur a été une des pierres d'achoppement des discussions à la conférence de Copenhague sur le climat de la fin 2009.

La pollution atmosphérique est très intense dans les mégapoles des pays pauvres,

où des millions de personnes fuient la misère à la recherche d'un travail improbable. On estime qu'à l'heure actuelle, dans les pays pauvres, chaque année de 2 à 4 millions d'enfants sont tués par la pollution atmosphérique dans les habitations. Mais la situation n'en est pas moins préoccupante dans les zones rurales isolées où la ventilation des habitations est insuffisante et où les fours rudimentaires de cuisson des aliments, utilisant la biomasse, produisent des concentrations élevées de poussières et de substances cancérigènes.

En conclusion, la limitation de l'utilisation des combustibles fossiles est nécessaire, non seulement à cause de leur raréfaction progressive, mais surtout pour préserver la santé des hommes et l'intégrité de la biosphère terrestre.

Faire le minimum : sauver la planète !

Actuellement, un citoyen des États-Unis consomme de l'énergie comme 2 européens, 6 Chinois, 22 Indiens et 70 Kenyans. Cette forte inégalité est aggravée par le fait que les pays qui consomment moins, sont de loin les plus peuplés. Selon les prévisions de l'Organisation des Nations Unies, dans les décennies à venir 2,5 milliards de personnes supplémentaires exigeront d'accéder à l'énergie.

Dans cette situation, il est clair qu'il n'y aura pas assez de réserves de combustibles fossiles pour que tous les habitants de la planète puissent pratiquer le mode de vie américain. Et dans un sens, on devrait ajouter « heureusement » parce que, sinon, le changement climatique et les problèmes de santé associés pourraient prendre un tour encore plus catastrophique.

Pour assurer l'avenir de l'humanité il est donc nécessaire de se désengager progressivement de l'utilisation de combustibles fossiles et de produire de l'énergie à partir d'autres sources. Les solutions possibles sont, comme nous le verrons, essentiellement de deux types : l'énergie de type solaire et autres énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. Les chapitres suivants examinent en détail les avantages et les inconvénients de ces deux formes d'énergie.

La crise énergétique est incontestable, bien que beaucoup de gens n'aient pas encore pris conscience de sa gravité. Trois données sont incontournables : l'épuisement progressif des combustibles fossiles, les dommages causés à la santé et à l'environnement par leur utilisation massive, la forte inégalité dans la disponibilité de l'énergie entre pays riches et pays pauvres.

La crise énergétique remet en question notre modèle de développement basé sur la consommation à tout prix qu'a créée ces dernières décennies l'offre importante d'énergie à bas prix et qui n'a bénéficié qu'à une minorité de la population de la Terre. Nous verrons dans les chapitres suivants quelques solutions possibles pour sortir de cette crise. Nous verrons aussi que l'explosion de la crise énergétique met en jeu d'autres problèmes, notamment, sur les plans culturels, éthiques et sociaux.

CHAPITRE 6

Énergie de l'atome

Une centrale nucléaire est aussi sûre qu'une fabrique de chocolat.
The Economist, Mars 29, 1986
(quatre semaines avant l'explosion de Chernobyl)

L'atome est la plus petite partie de chaque élément dans la nature. Il se compose de deux zones distinctes : un noyau central entouré d'un nuage d'électrons.

Le noyau est composé de particules chargées positivement, les protons, et de particules neutres, les neutrons, tous en contact très étroit. La périphérie est formée uniquement d'électrons, particules chargées négativement, éloignées et en mouvement frénétique (figure 9).

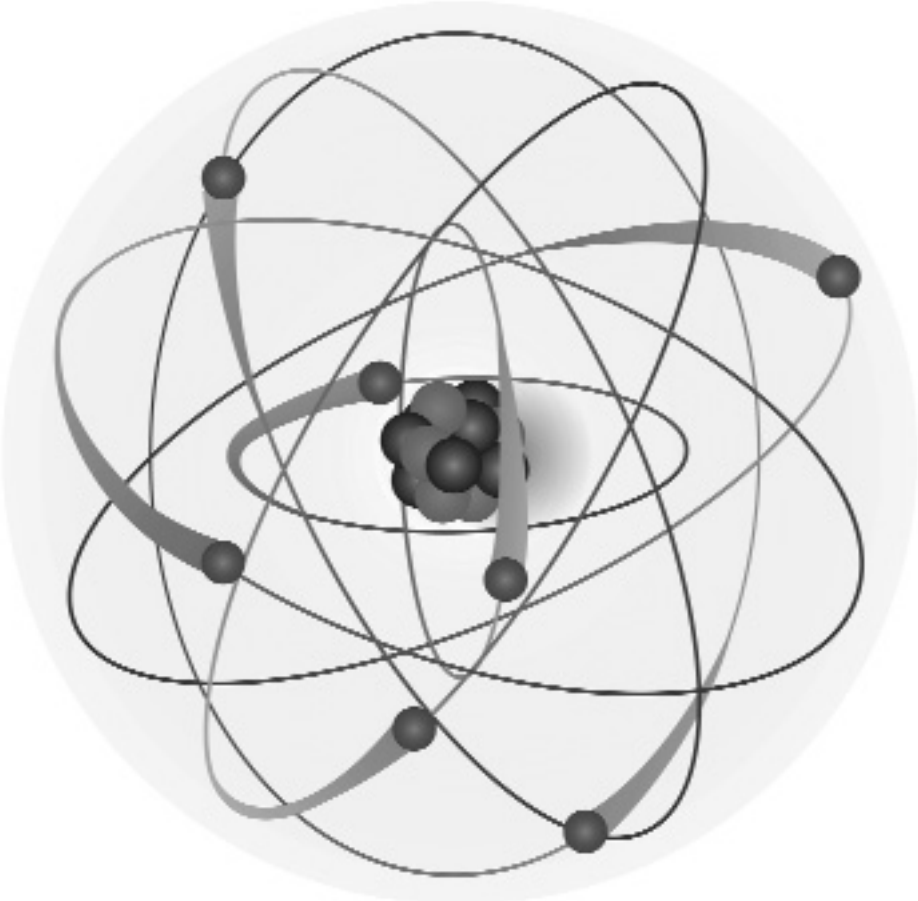


Figure 9. Diagramme de la structure de l'atome. La figure n'est pas à l'échelle : le noyau a en fait un volume mille fois plus petit que celui délimitée par les orbites des électrons.
Illustration:Charlotte Erpenbeck / Shutterstock

Les scientifiques qui ont découvert la structure de l'atome au début du XX_e siècle (le philosophe grec Démocrite en a suggéré l'existence 2300 ans plus tôt) ont été surpris de constater que le volume des atomes est essentiellement déterminé par le nuage d'électrons, tandis que le masse est presque exclusivement concentrée dans le noyau. En d'autres termes, les atomes sont faits d'une coquille de grand volume mais de poids négligeable et d'un noyau très petit mais très lourds. Ils sont donc des objets plutôt extravagant que même un architecte à l'imagination fertile aurait eu du mal à imaginer.

Les procédés de combustion, qui fournissent la grande majorité de l'énergie mondiale, font intervenir uniquement les composants périphériques de l'atome, les électrons. Lors d'une combustion des liaisons se forment et d'autres sont brisées et l'énergie potentielle qu'elle contenaient se transforme en énergie cinétique des atomes. Au cours de cette activité frénétique les noyaux atomiques restent inchangés, tout ce qui se passe autour d'eux ne les concerne pas du tout.

Et ne pensez pas que le changement est négligeable. Par exemple, au cours de la combustion du méthane (CH4), tout d'un coup, après 70 millions d'années de sommeil passées dans un réservoir souterrain, l'atome de carbone passe d'un nuage d'électrons en forme de tétraèdre, qui le lie à 4 atomes d'hydrogène, à un arrangement linéaire, qui le lie à deux atomes d'oxygène (CO_2).

Depuis la découverte du feu il y a des milliers d'années les choses se sont toujours passées comme cela, sans variation : tous les processus de transformation de la matière mis au point par les humains n'ont concernés que le nuage d'électrons des atomes laissant les noyaux inchangés. Les choses ont changé depuis la fin du XIXe siècle, quand on a commencé à comprendre progressivement la structure de l'atome et le rôle du noyau. Ceci a été possible grâce aux travaux de nombreux scientifiques, parmi lesquels Wilhelm Röntgen, Henri Bequerel Joseph Thomson, Marie et Pierre Curie, Ernest Rutherford, James Chadwick et l'équipe d'Enrico Fermi à l'Université de Rome, Amaldi, D'Agostino, Majorana, Pontecorvo, Rasetti, et Segrè.

L'affaire trouva sa conclusion le 2 décembre 1942. Ce jour particulier, Enrico Fermi a montré dans un gymnase de l'université de Chicago qu'il était possible de produire de l'énergie d'une manière contrôlée en « stimulant » les noyaux atomiques. La pile « atomique » de Fermi donnait accès au « feu nucléaire » dont la puissance incomparablement supérieure à celle du feu traditionnel ouvrit une nouvelle ère. Notre façon de voir le monde et de gérer les relations internationales furent changées à jamais, et à partir de ce jour, le vaisseau spatial Terre est devenue plus fragile.

La fission atomique

Pour mener à bien cette expérience historique Fermi n'avait pas pris n'importe quels atomes, il avait utilisé l'élément chimique le plus lourd que l'on puisse trouver dans la nature, l'uranium (U).

L'uranium qu'on trouve sur Terre est constitué à 99,3% d'atomes dont le noyau contient 92 protons et 146 neutrons, la somme de ces deux nombres est de 238 unités de masse atomique, c'est pourquoi on le nomme « l'uranium-238 » , 238U.

L'uranium intéressant pour la production d'énergie est, toutefois, la petite fraction qui reste, soit 0,7% du total. Cette fraction est fait d'un isotope, d'un type légèrement différent de noyau, qui contient toujours 92 protons dans le noyau, mais seulement 143 neutrons au lieu de 6, c'est l'uranium-235 ou ^{235}U.

L'uranium-235 est le seul atome fissile (capable de se briser spontanément en deux) qui existe dans la nature en quantités appréciables. Cet isotope rare d'un élément chimique est donc une source d'énergie primaire comme le soleil ou le pétrole.

La réaction de fission de l'^{235}U peut aussi être déclenchée par l'absorption de neutrons (n) de faible énergie, en produisant deux noyaux plus petits et 2 ou 3 neutrons. Par exemple ^{235}U peut donner un atome de baryum (^{141}Ba) et un atome de krypton (^{92}Kr), plus trois neutrons et beaucoup d'énergie, comme le montre la figure 10.

La somme des masses des deux noyaux issus de la fission d'un noyau d'uranium est plus faible que la masse initiale car une petite quantité de la masse de départ s'est transformée en énergie conformément à la loi d'Einstein $E = mc^2$. Pour chaque gramme de ^{235}U qui subit la fission environ 84 MJ d'énergie sont produits, essentiellement sous la forme d'énergie cinétique des noyaux finaux et des neutrons produits, soit l'équivalent de l'énergie obtenue par la combustion d'environ 20 tonnes de pétrole.

Chaque fission libère donc 2 ou 3 neutrons qui ont une énergie cinétique de 5 MeV environ, qui, après qu'on les ait freinés jusqu'à une vitesse presque nulle, sont à leur tour capables de provoquer la fission d'autres noyaux ^{235}U, déclenchant une réaction en chaîne. Pour que la réaction puisse s'auto-entretenir il est nécessaire qu'au moins l'un des neutrons produit par la fission rencontre un autre noyau d'uranium fissile avant de sortir du système. Cette condition est réalisée si la masse de matières fissiles dépasse une certaine valeur appelée masse critique à partir de laquelle la réaction en chaîne devient autosuffisante.

Si on ne prend pas la précaution de contrôler à la fois la vitesse et le nombre de neutrons dans le milieu réactif on risque de voir se produire un emballement de la réaction qui devient alors explosive.

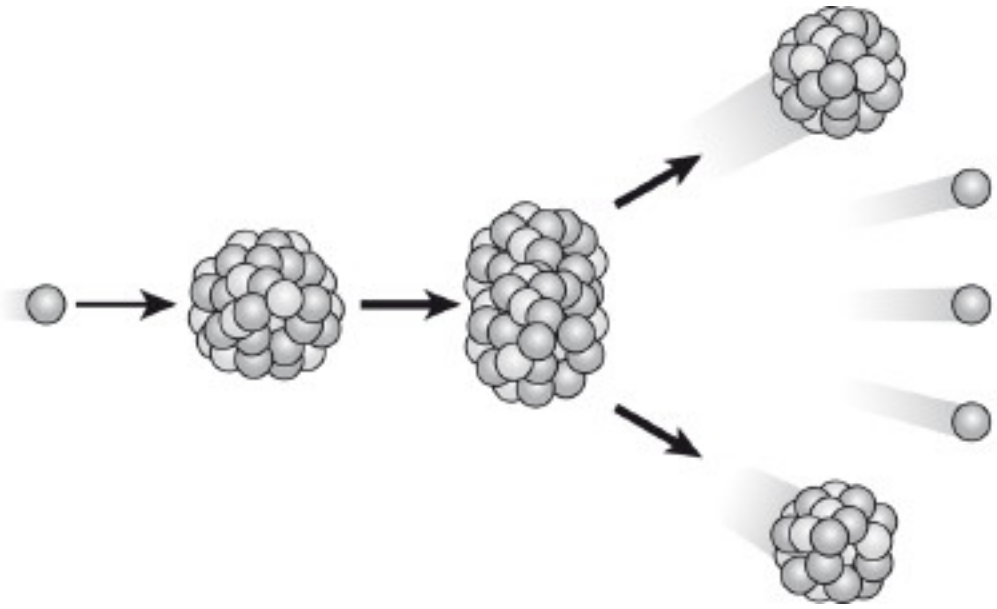


Figure 10. Schéma de la fission du noyau d'un atome de ^{235}U, déclenchée par un neutron lent avec la formation d'un noyau de de ^{141}Ba et de ^{92}Kr. La fission produit également 2 ou trois neutrons rapides qui, une fois ralentis, pourront fissionner d'autre noyaux fissiles et réaliser ainsi une réaction en chaîne.

Pour contrôler la réaction en chaîne, on place dans le milieu réactif des barres d'un matériau comme le cadmium, par exemple, qui absorbent une partie des neutrons les empêchant de participer à la réaction qui dès lors ralentit. On évite ainsi l'emballement de la réaction et donc l'explosion. De cette façon, on peut exploiter la chaleur produite par les particules et les rayonnements dans les centrales électriques.

Nous avons vu figure 10, une réaction nucléaire qui produit du baryum et du krypton, mais la fission de l'^{235}U peut également fonctionner sous d'autres régimes, en produisant de nombreux types d'isotopes légers, avec un nombre de protons compris entre 30 (zinc) et 65 (terbium). On recense un nombre total de plus de cent différents isotopes. Parmi ces produits, il existe divers éléments radioactifs et extrêmement nocifs pour la santé tels que le césium (^{137}Cs), l'iode (^{131}I) et le strontium (^{90}Sr), que le grand public a découvert au printemps de 1986, lors de l'explosion de l'un des réacteurs de la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine. Les retombées de ces éléments toxiques ou radioactifs ont affectés tous les pays d'Europe.

La radioactivité spontanée des atomes diminue avec le temps qui passe. Chaque isotope radioactif a une demi-vie qui est le temps requis pour que la moitié des noyaux d'un échantillon donné disparaissent en se transformant en noyaux d'isotopes d'autres éléments. L'isotope ^{131}I épuise sa radioactivité en quelques jours, tandis que le ^{137}Cs et le ^{90}Sr diminuent de moitié en 30 ans, demeurant radioactifs et dangereux pendant des siècles.

L'^{235}U a une demi-vie de 704 millions d'années et l'^{238}U de 4,5 milliards d'années. Il n'y a donc aucune inquiétude immédiate à avoir concernant la disparition naturelle des stocks d'uranium sur la planète.

Accidents

Le 26 avril 1986, le réacteur numéro 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, Union soviétique, est entré en divergence et a explosé. Dans les dix jours qui ont suivi, 6,7 tonnes de matières radioactives ont été larguées dans l'atmosphère, qui ont contaminé non seulement les zones situées à proximité de la centrale mais aussi certaines parties de l'Europe de l'Est, la Scandinavie et marginalement l'Europe occidentale.

On estime que l'accident - le pire à ce jour dans l'histoire de l'énergie nucléaire à usage civil - a, plus ou moins directement, touché 8,4 millions de personnes et a stérilisé 784 000 hectares de terres agricoles et 694 000 hectares de forêts. Une superficie de 30 km2 autour de la centrale est encore fortement contaminée et il n'existe pas de plan pour mettre en lieu sûr les nombreuses tonnes de matières radioactives de l'usine détruite. À cela s'ajoute le danger d'effondrement du sarcophage provisoire de béton qui recouvre le réacteur.

Vingt ans plus tard, malgré les différents rapports établis par des organisations internationales, il est difficile d'évaluer la catastrophe parce que l'effet des rayonnement persiste dans le temps. Environ 600 000 personnes depuis le personnel de la centrale nucléaire, les résidents, jusqu'aux les équipes d'urgence et les secouristes ont été touchées par les radiations. Les premières victimes ont été officiellement au nombre de 56, bien que d'autres sources parlent de 200. À cela s'ajoutent 9000 personnes, un nombre beaucoup moins élevé que prévu initialement, qui mourront prématurément à cause de l'exposition à des doses plus ou moins fortes de radiation. Environ 4000 enfants ukrainiens ont été atteints d'un cancer de la thyroïde causé par l'iode radioactif, heureusement, parmi eux seuls 15 en sont mort les autre ont été guéris.

Les populations ont aussi subit des dommages psychologiques extrêmement graves et complètement sous-estimés initialement. 350 000 personnes ont été évacuées, dont 116 000 immédiatement après l'accident. Seule une partie d'entre elles a pu retourner dans ses foyers. Beaucoup de ces personnes ont des problèmes d'équilibre mental : perte de confiance dans leur état de santé, forte dépression, perte d'initiative et fatalisme paralysant. L'alcoolisme s'est répandu. Il y a aussi des problèmes démographiques et des problèmes économiques parce que les jeunes les plus instruits quittent la région et que tout ce qui vient de la région de Tchernobyl est considéré avec suspicion.

Pour sécuriser l'épave du réacteur pour au moins les cent prochaines années, il faudra construire une énorme structure en forme d'arc (NCS, nouveau confinement de sécurité) d'une hauteur de 110 mètres et 270 de long, qui sera réalisée à l'écart et transportée sur une voie ferrée spéciale. Le coût estimatif de ces travaux est de 840 millions de dollars, pris en charge par les pays du G7 et l'Ukraine sous la

maîtrise d'œuvre de la BERD, la banque européenne de reconstruction et développement. Le coût économique total de la catastrophe est actuellement estimé à environ 6,7 milliards de dollars, sans qu'on puisse probablement en connaître jamais le vrai montant.

De nombreux autres incidents graves ont eu lieu au cours des cinquante dernières années. Le plus grave de l'histoire de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis s'est produit en 1979 lorsque le réacteur de Three Mile Island en Pennsylvanie est passé à deux doigts de la fusion catastrophique du cœur.

Un autre événement très grave s'est produit en 2002 à la centrale Davis-Besse, dans l'Ohio. À la suite d'une absence d'inspection de sécurité, une fuite d'eau riche en acide borique a progressivement rongé le couvercle en acier du réacteur, sur 15 cm, presque à le percer. Si le problème n'avait pas été détecté à temps, les conséquences auraient pu être extrêmement graves.

Le 16 Juillet 2007, un séisme de magnitude 6,7 sur l'échelle de ouverte de Richter a frappé le centre du Japon, causant 11 morts et de nombreux blessés. L'événement a impliqué la plus grande centrale nucléaire au monde, celle de Kashiwazaki-Kariwa, qui n'était qu'à 20 km de l'épicentre. À la suite du tremblement de terre l'incendie d'un transformateur a déclenché une chaîne d'événements qui a endommagé des fûts de déchets radioactifs, menant à la libération d'une quantité inconnue de matériaux et de déchets liquides.

La centrale est exploitée par la Tokyo Electric Power Company, un géant de l'industrie qui a été au centre de scandales répétés sur la falsification de données fournies pour les inspections et la sécurité de ses usines. Les autorités japonaises ont fermé la centrale pour une durée indéterminée, tant que ne seront pas garanties des normes de sécurité plus élevées qu'à l'ouverture du site il y a trente ans. Depuis, l'alarme causée par l'accident a eu de graves répercussions économiques sur le tourisme dans les zones côtières de la région.

Un héritage inconfortable

Les réactions de fission de ^{235}U dans les réacteurs nucléaires, comme nous l'avons dit, se produisent en présence d'un nombre plus grand d'atomes de l'isotope le plus abondant ^{238}U. Une petite partie de cet uranium naturel absorbe les neutrons et se transforme en ^{239}U, qui se désintègre rapidement en plutonium-239 (^{239}Pu).

Le plutonium est pratiquement absent dans la nature et ne peut être produit que par des réactions nucléaires. Il est si toxique et radioactif que si on en inhale moins d'un millionième de gramme on développe un cancer du poumon. Sa radioactivité est pratiquement éternelle sur une échelle de temps humaine : sa demi-vie est de 24 mille ans. Le 9 août 1945, une bombe contenant 6 kilos de plutonium a rasé la ville japonaise de Nagasaki, provoquant en un instant 80 000 décès. Plusieurs milliers d'autres personnes sont mortes ou sont tombées malades dans les décennies suivantes en raison des effets dévastateurs des radiations.

Produire de l'électricité par des moyens nucléaires procure, par conséquent, l'accès à un excellent matériau pour fabriquer des armes nucléaires, à savoir le plutonium. Cependant, il doit être extrait de la masse des combustibles usés, avec une technique dite de retraitement, qui nécessite des technologies très avancées. En 1977, le président des États-Unis, Jimmy Carter, afin de montrer l'exemple, a interdit le retraitement du combustible nucléaire irradié dans son pays, mais n'a pas trouvé d'imitateurs à l'étranger. Au moins cinq autres nations ont maintenant la technologie pour effectuer ce processus : le Royaume-Uni, la France, le Japon, la Russie et l'Inde. Bien sûr, la décision Carter n'a pas empêché les Etats-Unis de continuer à construire des ogives nucléaires, en utilisant d'autres moyens.

Le plutonium est sans doute une des substances les plus dangereuses que l'homme ait jamais créé. Depuis le début de l'ère atomique les centrales électronucléaires en ont produit environ 1500 tonnes, soit 15 millions de milliards de doses cancérogènes, plus de deux millions de doses pour chacun des habitants de la planète.

Où les mettre ?

Les déchets nucléaires sont divisés en deux catégories. Les déchets radioactifs de faible et de moyenne radioactivité qui incluent les équipements servant à la transformation du combustible, des sols contaminés, des appareils démantelés et les dispositifs de protection du personnel sur les installations.

Le combustible irradié ou des déchets de retraitement du combustible de radioactivité assez élevée doivent être conservés pendant au moins dix ans dans des systèmes de refroidissement spéciaux ; ces déchets sont en fait trop chauds, leur température est trop élevée, pour qu'ils puissent être manipulés et entreposés de manière permanente. Au cours de cette phase intermédiaire délicate on a recensé des dizaines de cas de perte de matières radioactives dans l'environnement.

Chacune des centrales nucléaires de 1000 MW produit environ 30 tonnes par an de combustible irradié fortement radioactif. Il s'agit d'un mélange complexe de gaz, de solides et de liquides qui contient des douzaines d'isotopes différents. Il s'agit à 94% d'uranium (essentiellement ^{238}U), 5% est composé de divers produits de fission (tels que ^{137}Cs et ^{90}Sr). Le pour-cent restant est constitué d'isotopes de masse supérieure à celle de l'uranium qu'on appelle globalement les transuraniens. On trouve parmi eux le plutonium et d'autres éléments artificiels présentant les mêmes dangers, tel l'américium (^{243}Am). D'un point de vue physico-chimique, le mélange est tellement complexe que même si le matériel n'est pas radioactif, il est très difficile à traiter.

Depuis les années soixante-dix les États-Unis et d'autres puissances nucléaires se sont posés le problème de trouver un moyen de stockage final des déchets radioactifs de leurs centrales et ceux provenant du démantèlement des ogives nucléaires.

Au début, cela semblait une tâche ordinaire. Après tout les États-Unis sont la nation la plus avancée technologiquement, la plus riche et la plus puissante de la planète, avec de vastes zones de terres éloignées, inhabitées et géologiquement sûres. Le site initialement identifié dans le Kansas s'est cependant avéré rapidement impropre au stockage de déchets radioactifs de longue durée car le terrain avait été percé d'innombrables forages lors de la recherche de gisements de gaz !

En 1978, des études ont commencé sur un autre site, Yucca Mountain, une sorte de bunker naturel dans le désert du Nevada à environ 150 km de Las Vegas. L'histoire troublée de ce site est rédigée dans des millions de pages de rapports et des séries entières de livres. Initialement, le site devait fournir fournir des garanties de sécurité de stockage pour cent mille ans, puis la période de sécurité a été réduite à « seulement » dix mille ans. Ces difficultés soulèvent alors la question de savoir si cela a un sens de certifier quelque chose pour une période de temps égale au double de l'histoire de la civilisation humaine.

Il reste à déterminer comment transporter en toute sécurité jusqu'au site d'enfouissement des milliers de tonnes de déchets nucléaires, en traversant le pays tout entier, dans toutes les directions. Aucune décision n'a pu être prise pour l'instant sur un choix entre les transports routier et ferroviaire.

À ce jour, les coûts pour la construction du site de Yucca Mountain ont été de plus de 60 milliards de dollars. Pas un seul gramme de déchets nucléaires n'y est encore déposé ; la date du début du stockage a déjà été reportée plusieurs fois et est actuellement prévue pour 2017. Pour le moment il faudra 15 autres milliards de dollars pour terminer le travail. Pendant ce temps, près des 104 centrales nucléaires américaines ont produit plus de 45 000 tonnes de combustible usé, attendant d'être mis en sécurité.

Le dépôt de Yucca Mountain pourra contenir 70 000 tonnes de déchets et doit être rempli progressivement au cours des trente prochaines années. Entre-temps, en 2017, les Etats-Unis auront déjà accumulé 85 000 tonnes de combustible usé de leurs centrales nucléaires de sorte que le dépôt sera déjà pratiquement plein, dix ans avant son ouverture !

Plus généralement, au rythme actuel de la production d'électricité et d'armements nucléaires, le monde aurait besoin d'un nouvel entrepôt d'une capacité de Yucca Mountain, tous les deux ans. Les États-Unis n'ont pas été en mesure d'en mettre un seul en service en quarante ans, période pendant laquelle il y a eu plusieurs enquêtes pénales contre des fonctionnaires publics et des entreprises privées accusés de falsification de documents et de corruption. À cause des dizaines de batailles juridiques en cours, certaines ayant atteint la Cour Suprême, il n'y a aucune certitude que le dépôt de Yucca Mountain ne fonctionne un jour.

La mise en sécurité des déchets nucléaires de la filière civile et la gestion des sites contaminés par des centaines de tests nucléaires menés pendant la Guerre Froide (Nouveau-Mexique, steppes d'Asie, atolls du Pacifique) sont parmi les pages les plus sombres et les plus inquiétantes de l'histoire des cinquante dernières années,

comme l'a noté l'agence des Nations Unies pour l'environnement.

L'utilisation de la mer comme décharge pour les déchets nucléaires est en cours depuis des décennies et l'on craint qu'elle ne soit encore pratiquée, bien qu'officiellement interdite à l'échelle internationale. Le trafic de matières nucléaires, favorisé par le vide du pouvoir qui pendant des années a caractérisé les républiques ex-soviétiques, est aujourd'hui un « business » très attractif pour les organisations criminelles internationales, y compris les italiennes.

Faisons les comptes

L'uranium est un métal peu abondant, qu'on peut considérer comme rare quand on le comparer à un métal d'usage courant comme l'argent. La croûte terrestre une concentration moyenne d'environ 3 parties par million (ppm) d'uranium : chaque tonne de roche en contient en moyenne 3 grammes.Toutefois, pour pouvoir extraire l'uranium à des coûts raisonnables il faut utiliser des minerais contenant de beaucoup plus fortes concentrations, de l'ordre de plusieurs centaines de ppm. (environ un demi kg par tonne).

Le débat sur les réserves effectivement exploitables d'uranium est ouvert et les valeurs les plus contradictoires circulent allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de millions de tonnes. La seule certitude est qu'il s'agit d'une ressource finie, qui atteindra un pic de production puis déclinera. En théorie, il est techniquement possible d'extraire l'uranium de la mer, où sa concentration est de 3,3 parties par milliard, soit environ 3 mg par tonne d'eau. Mais il reste beaucoup de chemin à parcourir avant qu'on ne puisse récupérer de manière économique et énergiquement sensée une partie des 4,5 milliards de tonnes d'uranium dissous dans les océans.

Aujourd'hui, la production d'uranium est bien inférieure à la demande, comme le montre la figure 11. La crise nucléaire dans les trois dernières décennies a freiné l'investissement dans l'exploitation minière. En conséquence, entre 2002 et 2007, le prix de l'uranium a augmenté plus de sept fois plus vite que celui du pétrole.

Figure 11. L'évolution dans le temps de la production et de la demande d'uranium. Jusque vers 1970, la production a été presque exclusivement à des fins militaires. Source des données:World Energy Council 2007

Parmi les 15 premiers détenteurs de réserves d'uranium, il n'y a pas un seul pays de l'UE (Figure 12), ce qui affaiblit objectivement la revendication de ceux qui, affirment que l'énergie nucléaire est la voie l'auto-suffisance énergétique de ou même de l'Italie.

Il est utile de rappeler également que la répartition de la consommation finale d'énergie en Europe est de 23% pour l'électricité et de 77% pour le combustible. Les centrales nucléaires produisent uniquement de l'électricité. Même si toute l'électricité était produite de cette manière, alors, nous aurions à peine recouvert

d'un quart de notre consommation d'énergie.

On semble souvent croire que l'énergie des centrales nucléaires est produite à partir de presque rien comme par magie, sans émission de gaz à effet de serre, sans pollution. La réalité est tout autre. Le cycle industriel de l'énergie nucléaire nécessite, en plus d'un investissement économique considérable, un investissement en énergie énorme. Cette énergie provient essentiellement des combustibles fossiles, comme c'est le cas pour toutes les sources d'énergie alternatives, y compris les énergies renouvelables.

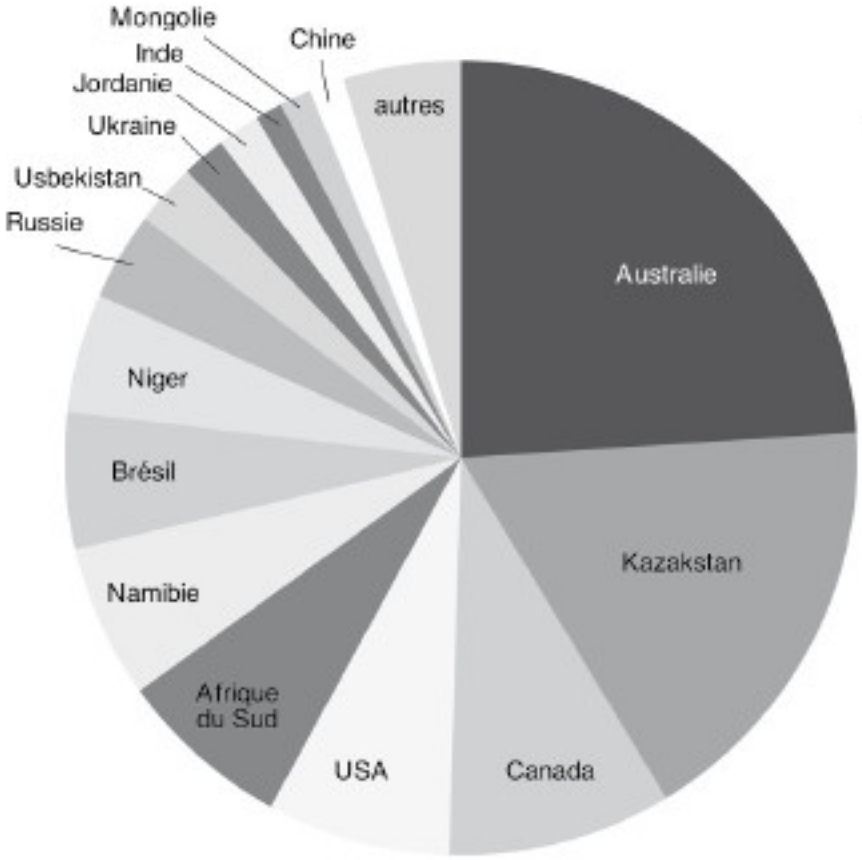


Figure 12. Répartition des réserves d'uranium dans le Monde.
Source des données:World Energy Council 2007

La production de combustible nucléaire, par exemple, est un processus long, complexe, polluant et coûteux en énergie. Les principales mines d'uranium dans le monde sont situées dans des endroits éloignés des lieux d'utilisation et l'extraction du minerai exige beaucoup de travail, y compris l'utilisation d'importants engins d'excavation.

Pour obtenir les 160 tonnes d'uranium nécessaire au fonctionnement d'une centrale standard de 900 MW pour une année si vous commencez avec du minerai riches en uranium (1000 ppm), il est faut en traiter 160 000 tonnes et le travail dans

les mines implique l'excavation de quantités importantes de roches. Mines et carrières doivent être protégées des infiltrations d'eau, et les eaux d'exhaure sont souvent versées dans les bassins hydrologiques environnants, avec des rejets de métaux lourds et d'isotopes radioactifs. Dans les mines il se dégage du gaz radon radioactif.

Pour obtenir un produit concentré, le « yellowcake » (de l'anglais gâteau jaune) contenant 80% d'oxydes d'uranium, principalement U_3O_8, le minerai extrait doit être transporté dans une installation industrielle spéciale où il est pulvérisé et traité avec des acides forts et d'autres produits chimiques. Les 159 840 tonnes de déchets qui restent après traitement, ainsi que les produits chimiques utilisés doivent être éliminés car ils contiennent des isotopes radioactifs.

Pour pouvoir être utilisé dans les centrales nucléaires, l'uranium doit être enrichi en 235U fissile depuis la concentration naturelle de 0,7% jusqu'à 3-4%. Pour ce faire l'oxyde U_3O_8 est converti en hexafluorure d'uranium (UF_6) qui est un gaz qu'on soumet à des traitements extrêmement couteux en énergie. Les chroniques de ces dernières années, avec le remue-ménage diplomatique déclenché par la volonté de l'Iran d'acquérir des installations de séparation isotopique, montre qu'il s'agit d'une clé de l'industrie nucléaire dans son ensemble. Celui qui possède cette technologie - et il y a très peu de pays dans le monde - possède la clé d'entrée dans le club nucléaire.

L'hexafluorure UF_6 doit finalement être retraité par un processus chimique complexe en UO_2 sous la forme de barrettes de la taille d'un filtre de cigarette, qui à leur tour sont insérées dans des tubes de zirconium de 3,5 mètres de long et d'un peu plus d'un centimètre d'épaisseur. Une puissance de 1000 MW contient 50 000 barres de ce type, qui doivent être remplacées tous les trois ans.

Encore plus bas dans le cycle de vie d'une centrale nucléaire il y a aussi des coûts élevés en énergie, ainsi on estime que le processus de démantèlement d'une telle centrale nécessite environ 250 PJ, une énergie dix fois supérieure à celle qui sert à démolir une centrale à gaz de même puissance.

Le temps d'amortissement énergétique d'une centrale est le temps nécessaire pour que le système commence à produire plus d'énergie qu'il n'en n'a été consommée pour la fabriquer. Dans le cas des centrales nucléaires, ce paramètre est rarement pris en compte. Des chercheurs australiens ont récemment estimé que, dans leur pays, avec la technologie actuelle, le temps d'amortissement d'une installation nucléaire serait d'environ 7 ans et il faudrait donc sept années de fonctionnement à pleine capacité avant que la centrale n'ait retourné l'énergie dépensée pour la mettre en œuvre. L'utilisation du conditionnel est obligatoire, car en Australie, où on trouve également les plus grandes réserves d'uranium au monde, aucune centrale n'a jamais été construite.

Centrales d'aujourd'hui

La première centrale nucléaire dans le monde, Calder Hall dans le nord de

l'Angleterre, a été connectée au réseau le 17 octobre 1956. Moins d'un an plus tard, le 8 Octobre 1957, il s'est produit un incendie dans une usine adjacente de production de plutonium qui a relâché sur toute l'Europe des nuages radioactifs. Cet accident est désormais oublié depuis longtemps, mais en son temps il a fait beaucoup plus de bruit que les accidents actuels. Les tours de refroidissement de Calder Hall, une véritable icône de l'ère nucléaire, ont été abattues le 29 septembre 2007. Au cours des cinquante années écoulées, ce site s'est fortement développé, devenant un grand centre de retraitement de matières nucléaires, maintenant appelé Sellafield. C'est un complexe industriel sujet de longue date à des différends d'ordre juridique et environnemental et responsable de la libération de quantités mal déterminées d'isotopes radioactifs.

L'énergie nucléaire représente aujourd'hui à peu près 15% de l'électricité mondiale et 6% du total de l'énergie primaire. La construction de centrales électronucléaires a fission a connu son apogée durant les trente années allant de 1956 à 1986. Pendant deux décennies, le nombre d'installations dans le monde est resté pratiquement stable à environ 440 unités (figure 13). Le parc de centrales est maintenant très âgé, avec un âge moyen de 23 ans (figure 14).

Dans le monde, il y a actuellement 31 centrales nucléaires en construction qui ne seront pas en mesure de remplacer celles qui seront mises hors service en raison de leur âge. En 2006, par exemple, deux nouvelles installations sont entrées en service et huit ont été fermées définitivement. Ces chiffres contrastent avec l'opinion largement répandue qu'il y a eu un boom dans l'énergie nucléaire. La vue est très statique dans les régions qui ont le plus grand nombre d'installations, les États-Unis et l'Europe occidentale il n'y a qu'une nouvelle centrale électrique en construction en Finlande.

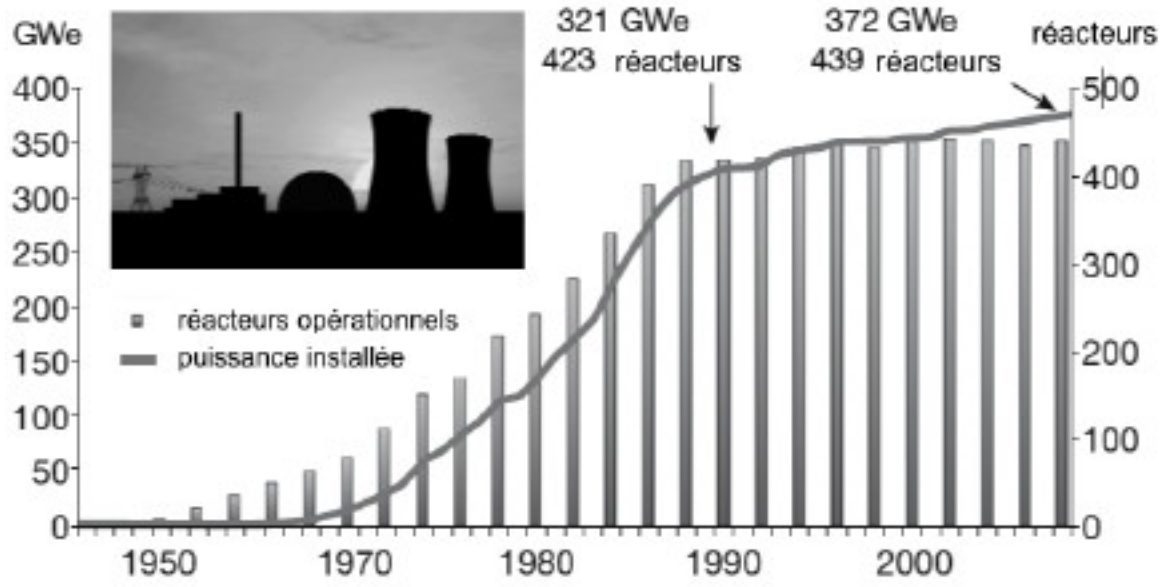


Figure 13. Évolution avec le temps du nombre de centrales nucléaires en service dans le monde et de la puissance électrique nucléaire installée

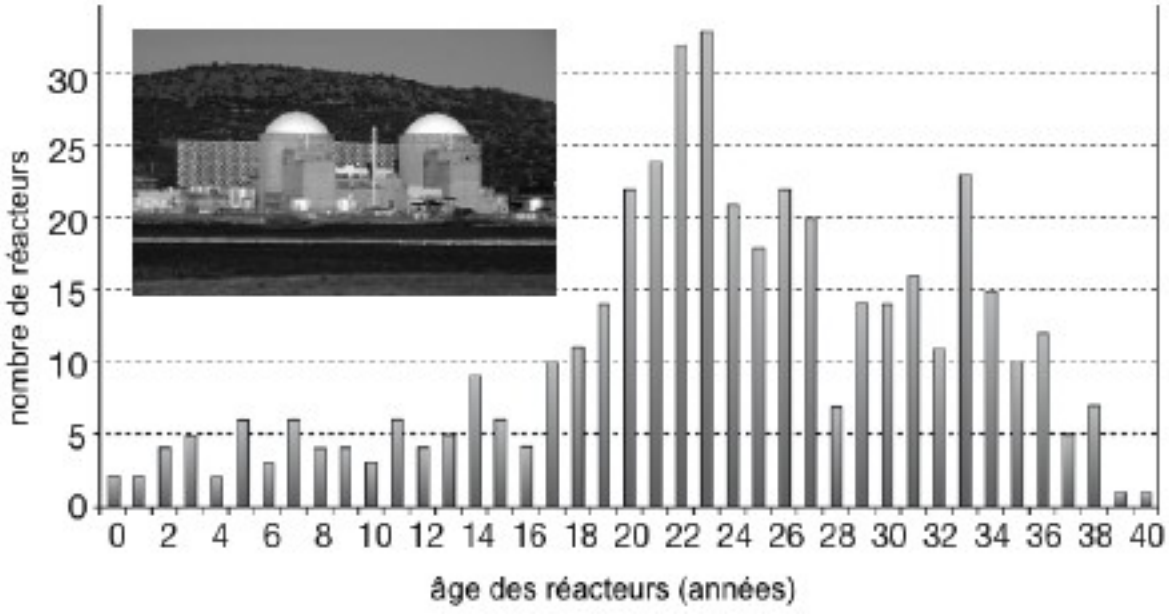


Figure 14. La répartition par âge des centrales nucléaires en service dans le monde (Juin 2007). L'âge est calculé à partir de la connexion de chaque réacteur au réseau électrique.
Source : European Nuclear Society. Photo:Gelpi / Shutterstock

En dépit de la stabilité du nombre d'installations, la puissance disponible de source électronucléaire a augmenté considérablement au fil du temps. Ceci est dû principalement à une gestion plus efficace des installations existantes. En 1973, les centrales nucléaires ont fonctionné pendant 50% du temps (les autres 50% étant consacrés à la maintenance) et aujourd'hui, malgré leur vieillissement, la partie utile du cycle de fonctionnement des centrales est de plus de 80% du temps.

Depuis 1956, la technologie nucléaire a évolué. La grande majorité des 439 centrales en service aujourd'hui appartiennent à la deuxième génération, avec des variantes. Les réacteurs les plus courants sont ceux à eau légère (LWR, ligot water reactor), qui utilisent l'eau ordinaire à la fois pour ralentir les neutrons et refroidir le cœur d'uranium enrichi. Le réacteur de Three Mile Island a été construit sur ce principe, alors que dans le réacteur de Tchernobyl l'eau n'était utilisée que pour le refroidissement du cœur tandis que du graphite était utilisé comme modérateur de neutrons. Ces installations sont soumises à l'usure et à la corrosion et leur entretien est coûteux et délicat.

Un certain nombre de centrales fonctionnent à l'eau lourde, D_2O dans laquelle l'hydrogène est remplacé par son isotope lourd D dont le noyau contient un proton et deux neutrons, les centrales les plus courantes de ce type utilisent la technologie canadienne CANDU. Elles utilisent de l'uranium naturel, non enrichi, mais par rapport aux centrales à eau légère la quantité de combustible irradié est beaucoup plus élevée et elles produisent de plus grandes quantité de plutonium.

Actuellement, les installations les plus modernes sont appelées de troisième génération, mais seulement 3 sont actives dans le monde. Il s'agit simplement d'une variante améliorée de centrale à eau légère plus compétitive du point de vue

économique.

Centrales de demain

Les centrales nucléaires de l'avenir devraient appartenir à la quatrième génération ou G4. Leur développement fait actuellement l'objet d'un protocole de collaboration internationale entre treize États, qui sera bientôt rejoint par l'Italie. Il convient de préciser immédiatement que les systèmes G4 ne seront éventuellement construits que dans 25 ans.

Aujourd'hui, il existe six différents types de projets G4, qui partagent au moins trois objectifs communs :
a) accroître le rendement de conversion des centrales électriques, qui est actuellement d'environ 30%,
b) fournir des installations intrinsèquement plus sûres et moins exposées à d'éventuelles utilisations militaires indirectes favorisant la prolifération nucléaire ;
c) rendre le cycle nucléaire économiquement compétitif avec les sources conventionnelles ou renouvelables.

La réconciliation entre ces trois exigences est un défi difficile, et le succès n'est pas garanti. Pour augmenter le rendement électrique, par exemple, les systèmes devront fonctionner à des températures comprises entre 500 et 1000° C (nous sommes aujourd'hui à environ 300° C) ce qui exigera de nouveaux matériaux résistants aux hautes températures et au rayonnement, et donc certainement très coûteux. Quatre des projets du G4 impliquent le retraitement du combustible usé, qui est économiquement coûteux et qui produit du plutonium. Cette production de plutonium ne va pas dans le sens d'un affaiblissement des facteurs de prolifération. La sécurité absolue de ces activités de retraitement ne peut jamais être garantie, ni sur le plan technique ni sur le plan économique.

L'un des facteurs essentiels à la survie à long terme de l'énergie nucléaire est la disponibilité en combustible. La disponibilité en uranium est limitée à un maximum de 50 ans avec les technologies et les niveaux de consommation actuels. Les projets G4 visent l'utilisation de 238U, qui peut être recyclé du combustible usagé, en le convertissant en plutonium par le bombardement par des neutrons rapides à haute énergie.

Dans certaines configurations les projets G4 sont surgénérateurs et produisent leur propre combustible. C'est possible lorsque le réacteur fonctionne avec un mélange de plutonium et d'uranium naturel ou appauvri. Comme nous l'avons vu, l'uranium peut se transformer en plutonium à la suite de réactions de fission sous l'effet de l'irradiation par les neutrons. Les tentatives visant à développer des surgénérateurs sûrs, fiables et économiquement viables, durent depuis des décennies et leur bilan est à la faillite, à commencer par le célèbre Superphénix français. Cette installation, partagée par l'État italien à travers ENEL a finalement été fermé en 1997 après 12 ans d'activité difficile, sur fond d'échec économique colossal.

L'éventuel succès des projets de la quatrième génération pourraient rendre virtuellement illimitée la disponibilité future de matières fissiles. Mais cela ne résout

pas le problème de la manipulation du combustible et la sécurisation des déchets.

La dure loi du marché

L'énergie nucléaire exerce un attrait indéniable pour sa puissance et l'élégance de la technologie, mais reste limitée par de nombreux autres facteurs : l'économie du cycle industriel, la sécurité des installations dans des conditions normales et en présence de scénarios catastrophes, tremblements de terre, attaques terroriste, l'élimination des déchets et bien sûr le lien indissoluble et ambiguë avec l'industrie militaire. Aucune autre activité industrielle ne serait autorisée à continuer de se développer sans avoir résolu des problèmes de cette gravité.

Face à un tableau si complexe, on assiste trop souvent à des discussions d'une superficialité affligeante dans laquelle l'option nucléaire est donnée comme propre, et économique. En Italie, ceux qui soutiennent cette opinion disent parfois que nous sommes obligés d'acheter au prix fort de l'électricité nucléaire à la France. Rien ne pourrait être plus éloigné de la vérité, c'est la France qui est obligée de vendre l'électricité aux pays voisins à faible coût pendant la nuit, pour se débarrasser de l'excédent produit par ses centrales. Les centrales nucléaires ne peuvent pas être allumée et éteintes à volonté avec un commutateur pour répondre aux fluctuations de la demande en énergie.

Dans un climat de polémique entre les pros et les antis, il est largement admis en Italie que la crise nucléaire est largement due aux écologistes. L'analyse de l'histoire de ces cinquante dernières années raconte pourtant une réalité très différente. Certes, les deux accidents majeurs de Tchernobyl et de Three Mile Island, ont sapé l'acceptabilité sociale de la technologie sur laquelle Fermi lui-même avait dès le début émis des doutes, mais la crise de ce secteur a des raisons essentiellement économiques.

La libéralisation des marchés de l'électricité a constitué un frein puissant aux investissements, démontrant clairement que l'énergie nucléaire ne survit pas au libre marché. Si les caisses de l'Etat n'assurent pas une couverture généreuse des coûts énormes de l'ensemble du cycle industriel, notamment celles en amont et en aval (construction et démantèlement des centrales), aucune entreprise privée n'est prête à investir un euro dans des projets qui sont susceptibles de connaître des risques de toutes sortes, à commencer par de longues et coûteuses batailles juridiques avec les communautés jouxtant les sites d'implantation choisis.

La relance potentielle des programmes nucléaires aux États-Unis, malgré la promesse d'un soutien généreux de l'Etat, ne provoque pas un enthousiasme excessif. Un autre problème est lié aux durées de construction qui sont de l'ordre de 10 ans ce qui implique une charge financière énorme en termes de frais d'intérêt. Un autre obstacle est constitué par la possibilité, quoique faible, d'un autre accident majeur quelque part dans le monde, s'il devait se produire, il risquerait de sceller la fin de cette technologie, qui ne peut littéralement pas se permettre de se montrer si vulnérable. En conclusion, l'industrie nucléaire civile est moribonde dans la plupart des pays développés depuis près de trois décennies et ce sont les lois du marché et la libre entreprise qui en sont la cause. Les

écologistes n'ont rien à y faire.

Le renouveau du nucléaire ?

À la lumière des énormes dégâts matériels et humains provoqués par les changements climatiques, certains scientifiques proposent de développer l'énergie nucléaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre émis par les centrales à combustibles fossiles.

Si on veut faire valoir que l'énergie nucléaire peut jouer un rôle important dans le système mondial de l'énergie entre aujourd'hui et 2050 il faut comprendre que le scénario minimum devrait être le remplacement des 439 installations existantes qui atteindront l'âge de la retraite et le remplacement de 50% des centrales à charbon actuelles, couvrant 50% de la nouvelle demande d'électricité.

Ce scénario impliquerait la construction d'environ 2500 centrales d'une puissance de 1000 MW chacune, soit une par une semaine à partir de maintenant jusqu'en 2050. C'est un scénario totalement irréaliste : le temps manque et on ne saurait pas où trouver des gisements d'uranium sans compter l'énormité des quantités de déchets à traiter, à commencer par des milliers de tonnes de plutonium.

Du reste, toutes les analyses autorisées réservent un rôle limité au nucléaire dans les scenari énergétiques du futur. L'agence Internationale pour l'énergie, par exemple, prévoit qu'en 2030 elle fournira environ 7% des besoins primaires en énergie, une valeur très proche de celle d'aujourd'hui. Ces données représentent un revers pour la technologie qui dans les dernières décennies a utilisé plus de 60% des financements pour la recherche et le développement de nouvelles technologies énergétiques dans les pays avancés.

Face à la menace d'une crise imminente de l'énergie et du climat, est-il logique de continuer à dépenser d'énormes quantités d'énergie intellectuelle et d'argent pour continuer à suivre le chemin le plus lent, coûteux, risqué, limité et rigide que nous avons à notre disposition ? Ne serait il pas temps de quitter le tunnel emprunté un lointain 2 décembre 1942 pour poursuivre plus vigoureusement des recherches sur les technologies d'énergie renouvelable ?

Vraiment rose la fusion ?

La fusion nucléaire est le processus physique qui se produit dans le Soleil et les étoiles. Deux noyaux atomiques légers d'hydrogène fusionnent pour former un noyau plus lourd d'hélium. Or la masse du noyau d'hélium est plus petite que la somme des masses des deux noyaux d'hydrogène de sorte que, conformément à la loi d'Einstein (figure 15) la masse manquante est libérée sous la forme de rayonnement électromagnétique et d'énergie cinétique. Pour utiliser, ici sur Terre ce processus, les candidats optimaux sont le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'hydrogène dont la fusion libère une plus grande énergie que simplement deux noyaux d'hydrogène. D'un gramme de ces isotopes on peur extraire avec la fusion, une énergie égale à celle libérée par 11 tonnes de charbon.

La fusion nucléaire a été exploitée, dans les bombes que l'on appelle « à hydrogène » ou bombe H. Pour la production d'énergie il est nécessaire de ralentir la réaction pour qu'elle ne soit pas explosive. Aujourd'hui, la recherche dans ce domaine en est encore au stade préliminaire.

À long terme, la fusion nucléaire pourrait être la solution radicale au problème de l'énergie. En effet, elle pourrait produire des quantités pratiquement illimitées d'énergie avec une très faible émission de gaz nocifs ou de gaz à effet de serre et une production limitée de déchets radioactifs dans certains composants du réacteur, à courte demi-vie.

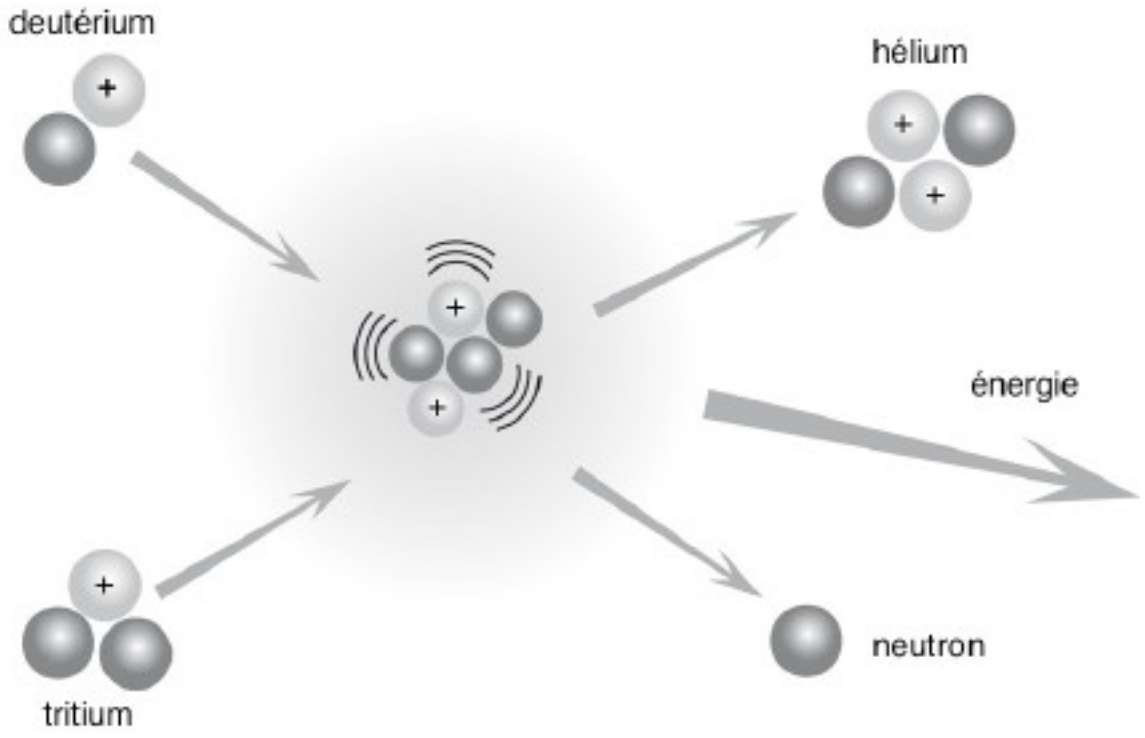


Figure 15. Un aperçu du processus de fusion nucléaire : un noyau de deutérium et le tritium fusionnent pour former un noyau d'hélium, libérant de l'énergie.

En 1972, il a été prédit qu'en l'an 2000, il serait possible de produire de l'électricité en utilisant les installations commerciales basées sur la fusion nucléaire, mais la prédiction s'est avérée être trop optimiste. Les expériences réalisées jusqu'ici n'ont réussi à produire au maximum que quelques dizaines de MW pour de courtes durées, en consommant plus d'énergie qu'il n'en a été produite.

La technique la plus prometteuse pour exploiter la fusion nucléaire utilise un équipement appelé tokamak, une grande chambre à vide en forme de beignet. On y injecte un mélange de deutérium et de tritium chauffé pour produire un plasma, c'est à dire un gaz ionisé, qui est confiné par de puissants champs magnétiques, pour éviter qu'il entre en contact avec les parois et se refroidisse. Si on arrive à y maintenir le plasma de deutérium et de tritium pendant un temps suffisant à des températures très élevées, de l'ordre de 100 millions de degrés, on peut allumer une petite étoile sur la Terre.

Cette approche est étudiée dans le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), dont la construction a commencé dans le sud de la France, à Cadarache avec la participation des principaux pays consommateurs d'énergie. Si tout va bien nous arriverons à la construction d'une première installation de démonstration de 500 MW pour 2020, qui ne produira que de la chaleur. Si tout va bien encore, le projet sera suivit par le projet DEMO qui produira lui 1500 MW électrique. Le budget initial du projet ITER est de 8 milliards d'euros déjà passé à 10 milliards mais qui devra sans doute est encore allongé de plus de trois milliards. De nombreux scientifiques restent sceptiques quant à la faisabilité de la fusion nucléaire. En tout cas, il faut espérer que la cavalerie de la fusion arrivera à temps pour nous aider à sortir en douceur de l'ère des combustibles fossiles.

Chapitre 7

L'énergie du soleil

Si notre civilisation noire et nerveuse, basée sur le charbon, est suivie par une civilisation plus tranquille basée sur l'utilisation de l'énergie solaire, cela ne pourra que contribuer au progrès et au bonheur de l'humanité.
Giacomo Ciamician, 1912

Le vaisseau spatial Terre n'est pas un système isolé. Il doit répondre aux nombreux besoins de son équipage avec des réserves non renouvelables entreposées dans sa cale, mais il a aussi un gros atout car il reçoit en permanence du Soleil une immense quantité d'énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique : lumière et chaleur.

C'est cette énergie qui renouvelle les ressources fondamentales de la Terre comme les produits du monde végétal et l'oxygène par le biais de la photosynthèse, et avec eux la pyramide alimentaire. L'eau potable est renouvelée, par l'évaporation des mers et les précipitations, tandis que le vent est le résultat de la formation de gradients de température qui déplacent de grandes masses d'air.

Même les combustibles fossiles sont une ressource sans cesse renouvelée par la lumière du soleil, à travers la photosynthèse. Dans la pratique cependant, ils constituent une ressource non-renouvelable parce que leur temps de formation est un million de fois plus long que celui dans lequel ils sont consommés.

L'énergie solaire est abondante : en moins d'une heure la Terre reçoit du Soleil une quantité d'énergie égale à une année de consommation de l'ensemble du monde. L'énergie solaire, contrairement aux combustibles fossiles, est présente partout sur la planète, avec toutefois des différences significatives en fonction de la latitude. Et comme le soleil continuera à briller pendant encore environ 5 milliards d'années, l'énergie solaire, en plus d'être abondante et bien répartie, est également inépuisable à notre échelle de temps.

Elle a cependant deux défauts qui modèrent son intérêt : elle est à basse intensité et elle est intermittente car elle dépend de l'alternance entre le jour et la nuit aussi bien que des conditions météorologiques.

Le mode de vie actuel dans les pays les plus développés exige une densité de puissance allant de 20 à 100 W / m^2 pour les logements logements et de 300 à 900 W/m^2 pour une aciérie.

La densité de puissance de l'énergie solaire est en moyenne d'environ 170 W/m2, une valeur qui est considérablement réduite lorsqu'elle est convertie en énergie utilisable. Il ne sera donc jamais possible de faire tourner des aciéries et autres structures à très forte consommation d'énergie, tels que les hôpitaux, avec l'énergie du rayonnement solaire qui tombe en un jour sur leurs toits.

Dès lors il est facile de deviner que le principal défi scientifique et technologique du futur proche est d'imaginer comment accommoder le flux gigantesque de l'énergie solaire, pour pouvoir l'utiliser à la demande avec l'intensité nécessaire.

Convertir pour exploiter

Comme nous l'avons vu, l'énergie est beaucoup plus utile quand elle est concentrée (sans trop en faire, pour ne pas la rendre dangereuse), stockable et transportable. Les raisons en sont simples :

1) l'énergie sous une forme concentrée est nécessaire pour répondre aux besoins des structures de grande taille et complexes, et aussi bien sûr, qui peut le plus peut le moins, la réciproque n'étant pas vraie ;

2) quand elle est stockable, l'énergie peut être accumulée toujours prête à l'emploi ;

3) quand elle est transportable, l'énergie peut être utilisée dans des lieux autres que les lieux de stockage ; dans le cas des voyages sur de longues distances, en particulier avec les avions et les navires, il est absolument nécessaire de disposer d'énergie transportable.

Les matériaux combustibles, en particulier les combustibles fossiles, répondent aux trois exigences, à des degrés divers. L'électricité satisfait la première et la troisième (pour la seconde il faudrait qu'existent des batteries plus efficaces que celles d'aujourd'hui). L'énergie thermique, au mieux, satisfait la première exigence, quand il est sous la forme de chaleur à haute température.

L'énergie qui provient du soleil peut être facilement convertie en chaleur à basse température mais il est plus difficile de la convertir en chaleur à haute température, en électricité ou encore en carburant.

De la lumière à la chaleur

La conversion d'énergie solaire en chaleur à basse température peut être réalisée par des panneaux solaires. Ces panneaux solaires, qu'il ne faut pas confondre avec ceux qui produisent de l'électricité, contiennent des tubes où circule un liquide chauffé par le soleil qui est utilisé pour chauffer un réservoir d'eau (figure 16).

Un panneau d'environ 3 m^2 est suffisant, sous nos latitudes, pour fournir l'eau chaude à usage domestique pour un ménage moyen. Avec plus de surface de panneaux on peut aussi alimenter un système de chauffage par le sol pour les bâtiments.

Un panneau solaire a une durée de vie d'au moins 30 ans, ne nécessite qu'une maintenance mineure et deux ans suffisent à produire une quantité d'énergie égale à celle qui était requise pour sa fabrication. C'est une technologie simple, fiable et

peu coûteuse pour les particuliers, grâce aux incitations récemment promues par de nombreux gouvernements. Dans certaines régions européennes, les logements neufs ont l'obligation légale d'installer des panneaux solaires.

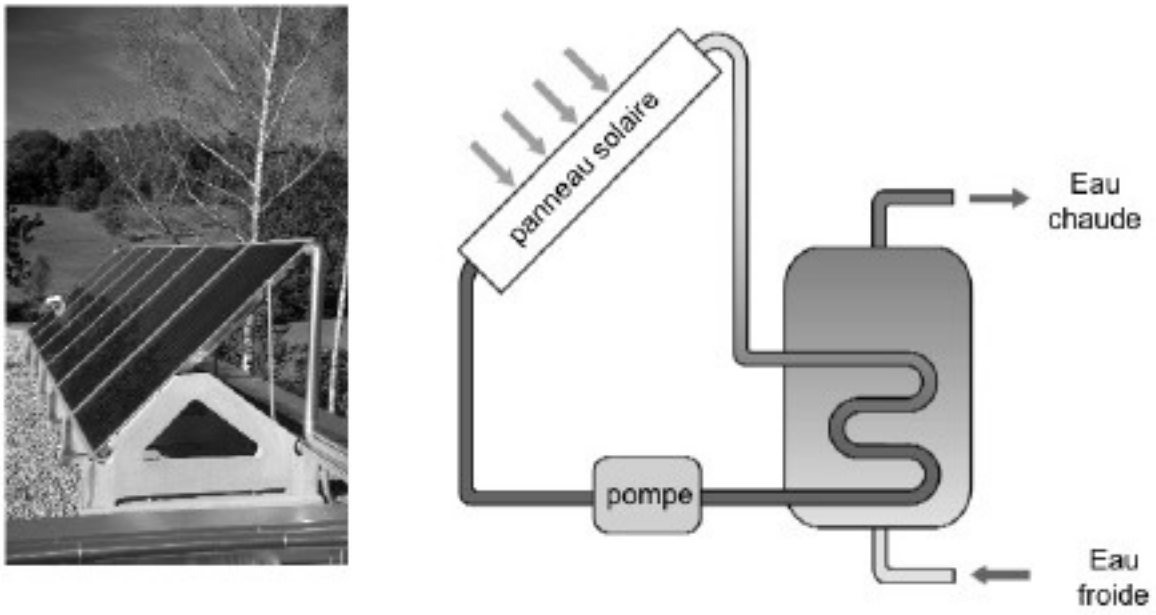


Figure 16. Panneaux solaires pour la production d'eau chaude à usage domestique et leur mode de fonctionnement. Photo: photos.fritz / Shutterstock

À la fin de 2007, la capacité installée de panneaux solaires était de 125 GW, soit une augmentation de 20% (50% en Europe) par rapport à l'année précédente. En 2006 ont été installés dans le monde 25 millions de mètres carrés de panneaux solaires, 75% d'entre eux en Chine.

L'utilisation de panneaux solaires conduit aussi, indirectement, à économiser de l'électricité. En fait, les maisons modernes, utilisent de grandes quantités d'électricité pour chauffer l'eau dans les machines à laver et dans les lave-vaisselles.

En Italie, l'utilisation de panneaux solaires pour chauffer l'eau domestique est encore rare, la surface de panneau solaire par habitant est 23 fois moins étendue que celle de l'Autriche et 20 fois inférieur à celui de la Grèce. Il convient de noter ensuite que la plupart des systèmes solaires italiens sont situés dans le Haut Adige et pas dans la partie plus ensoleillée du Sud. Même l'eau chaude des bains et des douches Italiens est presque toujours obtenue par la combustion de gaz de ville. Ceci est un symptôme tout à fait exemplaire d'un pays incapable de regarder vers l'avenir.

De la lumière à l'électricité

La conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique se produit dans les cellules solaires photovoltaïques, où un matériau semi-conducteur, généralement le silicium, absorbe la lumière du soleil en donnant lieu à un

mouvement de charge électrique. Les cellules solaires individuelles sont interconnectées en modules qui sont assemblés en panneaux photovoltaïques (Figure 17).

Pour répondre aux besoins en électricité d'une famille moyenne sous nos latitudes, une superficie d'environ 20 m2 de panneaux photovoltaïques est nécessaire. Cette technologie est utilisée depuis longtemps dans des lieux éloignés des réseaux de transmission électrique (comme les refuges de montagne et les satellites artificiels) ou qui nécessitent de petites quantités d'énergie (comme les calculatrices, les ordinateurs portables).

L'industrie photovoltaïque connaît actuellement une croissance de 40% par an, mais produit encore une quantité d'énergie extrêmement faible - environ 11 GW de capacité installée totale dans le monde à la fin de l'année 2007 - par rapport à celle produite par les centrales électriques à combustibles fossiles ou nucléaires.

Figure 17. Panneaux photovoltaïques qui convertissent la lumière solaire en électricité. Photo : Tom Grundy / Shutterstock

Actuellement les panneaux photovoltaïques en silicium ont une durée de vie d'environ 30 ans et retournent en 1 à 3 ans, l'énergie qui est nécessaire à leur fabrication. Le coût de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est encore deux à cinq fois plus élevé que celui de l'électricité produite par les combustibles fossiles. Les prix devraient diminuer à mesure que progresse la production. Il doit être souligné, cependant, que le photovoltaïque est d'ores et déjà compétitif si on tient compte des coûts externes des combustibles fossiles, qui ont été évoqués plus haut.

Il est intéressant de noter que la nation avec le taux de croissance le plus élevé au

monde dans le photovoltaïque et le Kenya. Cette technologie permet de produire de l'énergie sur le lieu de son utilisation, sans avoir à investir dans un réseau coûteux de distribution à longue distance, et cette technologie est donc particulièrement bien adaptée à la situation des pays pauvres qui n'ont pas les ressources économiques nécessaires pour construire des infrastructures. Comme il a déjà été dit, il est estimé que dans le monde il y a encore 1,6 milliard de personnes n'ont pas accès au réseau électrique.

Les leaders mondiaux de l'industrie photovoltaïque sont l'Allemagne et le Japon, qui profitent maintenant du choix volontariste de l'innovation industrielle qu'ils ont fait il y a plus de vingt ans. Les États-Unis tentent de regagner le terrain perdu, se jetant dans la course pour la deuxième génération de cellules photovoltaïques solaires, à base de films minces.

Depuis décembre 2007, la société américaine Nanosolar produit ce type de cellules avec une technique similaire à celle avec laquelle on imprime des journaux. On dépose sur une feuille d'aluminium une encre qui contient un mélange de nanoparticules semi-conductrices de cuivre, d'indium , de gallium et de sélénium. D'autres recherches permettront de déposer des cellules solaires sur des feuilles de plastique souples ou même de les incorporer dans de la peinture. Beaucoup prédisent que l'énergie photovoltaïque sera la prochaine technologie de rupture qui va changer radicalement notre façon de produire et de distribuer l'électricité.

Les systèmes photovoltaïques sont généralement placés sur les toits des maisons et des établissements industriels et peuvent être isolés ou connectés au réseau de distribution. Dans le premier cas, ont utilise des batteries pour le stockage d'énergie durant la journée pour une utilisation nocturne. Dans le second cas, de l'énergie est échangée avec le réseau, avec vente du surplus au cours de la journée et achat pour les besoins des heures d'obscurité. Avec un prix incitatif pour la production, en fin d'année on encaisse la différence, c'est la compagnie d'électricité qui paie le producteur-consommateur, et non l'inverse. Aujourd'hui on peut récupérer son investissement en moins de 10 ans.

La production d'électricité photovoltaïque nécessite beaucoup d'espace pour la collecte de la lumière, mais pas autant qu'on pourrait le penser. On calcule que l'utilisation de panneaux ayant une efficacité de conversion de 10% qui est déjà disponible, il suffirait de couvrir une surface de de 161 km de côté de panneaux solaires pour produire toute l'électricité consommée aux Etats-Unis. Il s'agit certainement d'une grande surface, mais elle représente cependant moins d'un quart de la surface des autoroutes américaines. Une étude récente indique que, pour répondre aux besoins en électricité des européens avec des panneaux photovoltaïques il serait nécessaire de couvrir une moyenne de 0,6% de la surface des différents états (Figure 18). Pour l'Italie il faudrait 2400 km2, une superficie aussi grande que la province de Plaisance.

Pour produire toute l'énergie consommée aux États-Unis par l'usage du solaire, électrique ou non, il suffirait d'utiliser 2,7% du territoire national. Ce pourcentage s'élève à 24% du territoire de la Belgique et à seulement 0,3% pour le Brésil.

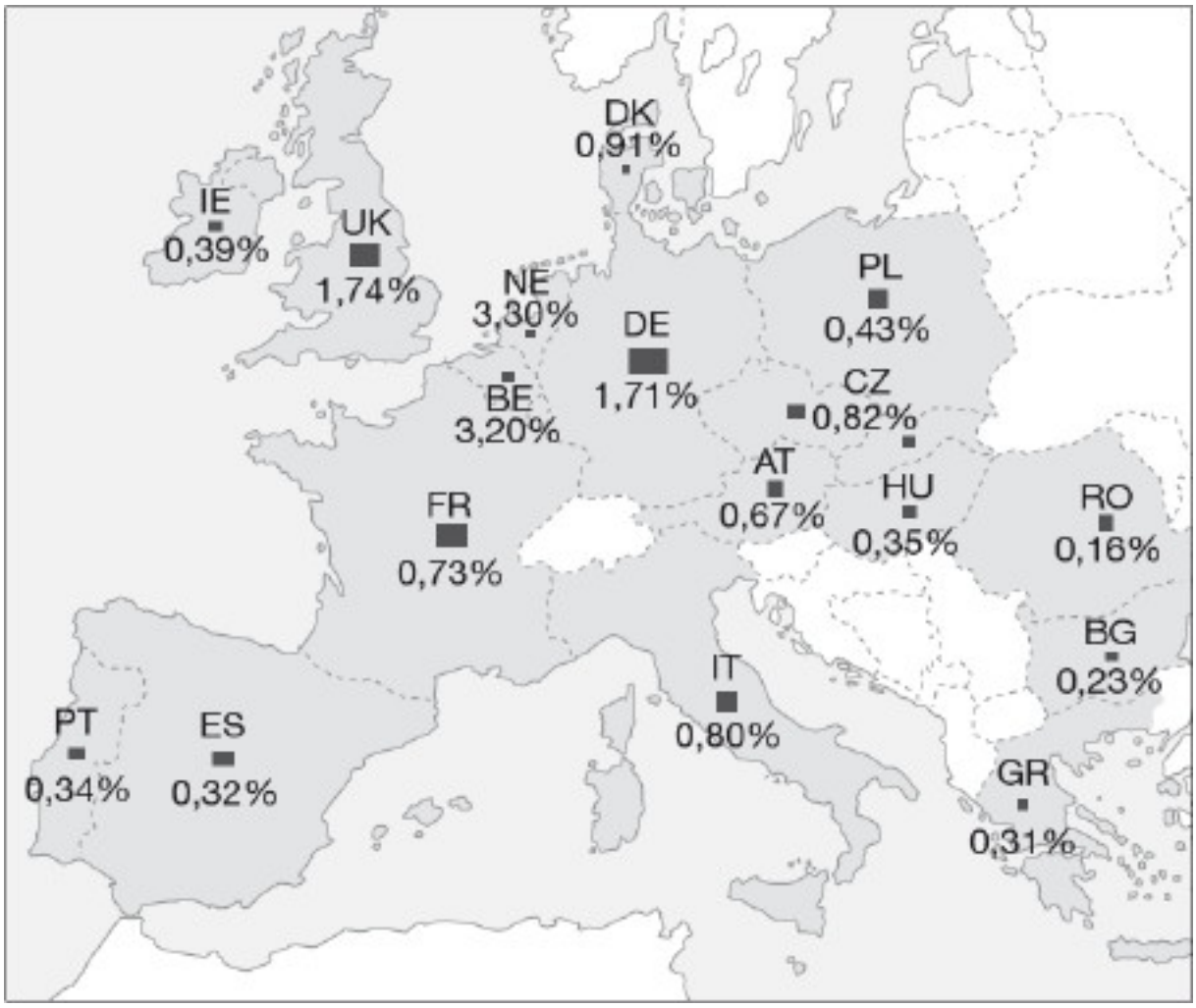


Figure 18. Pourcentage de la surface des pays européens qui devrait être couvertes de panneaux photovoltaïques pour produire toute l'énergie électrique nécessaire au pays.
Source : l'énergie solaire 81 (2007) p. 1295-1305

Concentrer la lumière

La conversion d'énergie solaire en énergie électrique peut également être obtenue en exploitant l'énergie mécanique de la vapeur produite par les liquides à haute températures, via des turbines et des alternateurs, comme dans les centrales thermiques classiques.

Pour atteindre des températures élevées il faut concentrer la lumière solaire collectée par un champ de miroirs sur une chaudière, ou alternativement, on peut utiliser des collecteurs paraboliques linéaires qui concentrent la lumière sur un tuyau dans lequel circule un fluide qui absorbe la chaleur. La première méthode est maintenant abandonnée, et la seconde, plus efficace, n'a pas encore atteint sa pleine maturité. Plusieurs centrales sont en construction en Espagne et aux États-Unis, il y a même une à Priolo, en Sicile, résultat d'un projet commun entre ENEL et l'ENEA.

L'une des façons d'utiliser les températures élevées issues du solaire est la production d'hydrogène par scission thermique de l'eau. On discutera plus loin l'utilisation de l'hydrogène comme médium énergétique.

De la lumière à l'énergie chimique : la photosynthèse naturelle

La photosynthèse est un processus qui se produit naturellement dans les plantes : la lumière solaire est absorbée par les molécules de chlorophylle qui transforment des matières à bas contenu énergétique comme l'eau, H2O, et le dioxyde de carbone, CO2 en substances à fort contenu énergétique tels l'oxygène, O2, et le contenu en carbohydrates des produits végétaux.

$$H_2O + CO_2 \xrightarrow[\text{chlorophylle}]{\text{lumière solaire}} O_2 + \text{carbohydrates}$$

La photosynthèse naturelle, qui, en dernière analyse, convertit la lumière du soleil en énergie chimique, est aussi le processus qui, indirectement, nous a donné les gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel). Ces composés ont été en fait formés en sous-sol par la transformation d'organismes végétaux et animaux, par des réactions chimiques complexes se produisant tout au long de centaines de millions d'années. Comme il a été dit plus haut, la photosynthèse naturelle continue aujourd'hui à produire des combustibles fossiles, mais elle le fait à un rythme beaucoup plus lent que celui avec lequel nous les consommons.

La photosynthèse naturelle peut convertir tout au plus environ 5% de l'énergie de la lumière solaire en énergie chimique, mais en moyenne seulement 0,3% de l'énergie solaire atteignant la surface de la Terre est transformée en matière végétale, dont seulement une petite fraction peut être recueillie et utilisée.

Le processus de la photosynthèse naturelle est très complexe, mais son mécanisme a été largement compris grâce à des études réalisées ces dernières décennies. Les premières étapes sont les suivantes :

1. la lumière est absorbée par les feuilles des plantes à travers un système organisé de molécules de chlorophylle, qui passent dans état électronique excité ;

2. l'énergie électronique est transmise et transportée, un peu comme dans une antenne, sur un site spécifique, appelé centre réactionnel ;

3. sur ce site, l'énergie est utilisée dans un temps très court, de l'ordre de la picoseconde, 10-12 s, pour séparer des charges de signes opposés, une charge positive d'un côté et une charge négative de l'autre.

À partir de cette série, les réactions se poursuivent dans un processus très complexe qui conduit à la formation d'oxygène libre et de carbohydrates. Tout ceci est rendu possible par une organisation moléculaire précise, résultat de milliards

d'années d'évolution. Cette évolution a conduit à des organisations spatiales spécifiques réglant les distances entre les différentes molécules impliquées dans le processus, elle a conduit aussi à une organisation temporelle où certaines réactions doivent être beaucoup plus rapides que d'autres et à une « gestion » de l'énergie qui permet à chaque étape réactionnelle d'utiliser une partie de l'énergie solaire reçue.

La biomasse et les biocarburants : oui, mais les yeux ouverts !

Actuellement, le processus de la photosynthèse naturelle produit environ 230 milliards de tonnes de masse végétale terrestre et marine chaque année. Cette biomasse est un véritable « carburant solaire », stockable et transportable, mais avec une densité d'énergie moyenne beaucoup plus faible que celui des carburants fossiles.

La biomasse peut être brûlée pour produire de la chaleur, mais aujourd'hui on est bien plus intéressé par son utilisation pour produire des biocarburants qui peuvent être utilisés en combinaison avec des combustibles fossiles, ou qui peuvent même les remplacer. Le biodiesel est produit principalement par traitement chimique d'huiles végétales de divers types, comme le colza et le tournesol. Le bioéthanol est obtenu par fermentation de produits agricoles riches en glucides et en sucres comme le maïs, la canne à sucre et la betterave à sucre ; au Brésil on utilise la canne à sucre et du maïs aux États-Unis. Le bioéthanol peut être utilisé pur, dans des moteurs spécialement préparés ou mélangé à l'essence. Le Brésil a remplacé environ 40% d'essence dans les carburants pour la traction automobile, et certains pensent que ce modèle est exportable dans le reste du monde.

En réalité évaluer l'importance des biocarburants n'est pas facile, pour un certain nombre de raisons détaillées dans la figure 19 :

a. il faut plus de dix étapes différentes pour produire des biocarburants (préparation et distribution d'engrais dans le sol, labourage, récolte, transport, etc) qui nécessitent une forte consommation d'énergie, habituellement d'origine fossile.

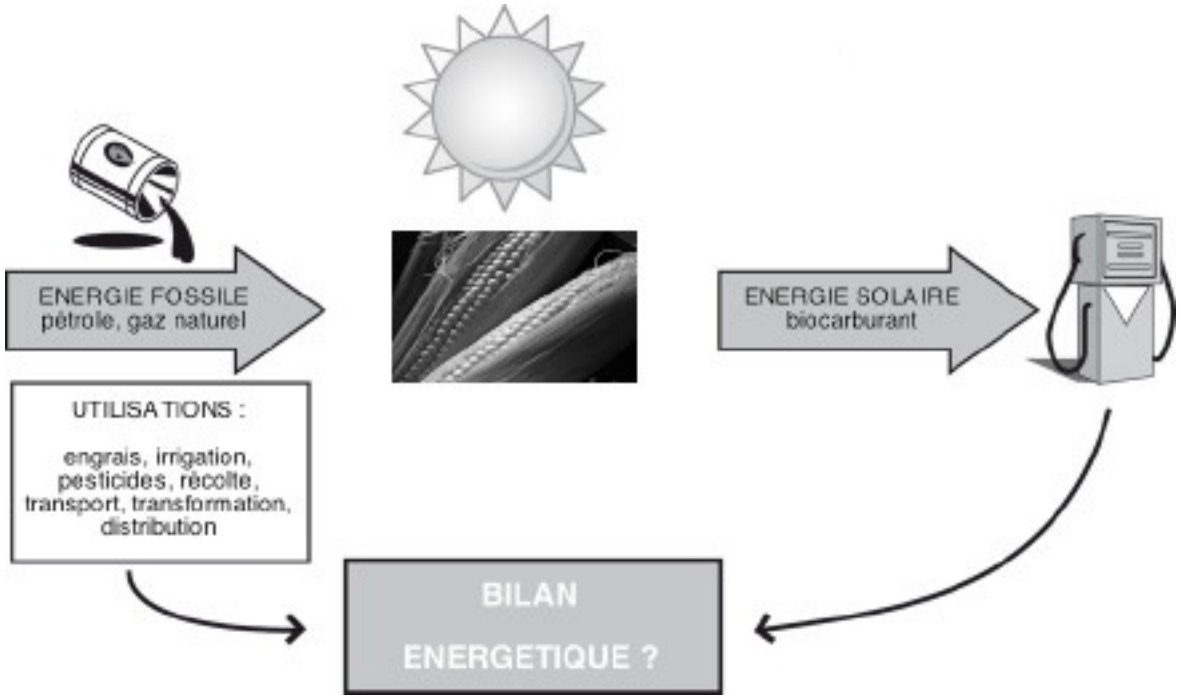


Figure 19. La production de biocarburants requiert, en plus de l'utilisation de terres fertiles, de grandes quantités de combustibles fossiles.

Des spécialistes affirment même que, globalement, l'apport d'énergie pour produire certains biocarburants (par exemple l'éthanol à partir du maïs) est supérieur à celui obtenu par l'utilisation du bio-combustubile lui-même ;

b. pour obtenir de grandes quantités de combustibles à partir de la biomasse de vastes étendues de terre et d'énormes quantités d'eau pour l'irrigation sont nécessaires ;

c. la culture extensive à des fins énergétiques peut conduire à la destruction d'écosystèmes précieux pour l'équilibre de la biosphère, comme les forêts tropicales ;

d. Il n'est pas facile d'estimer quels avantages apportent les biocarburants pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, compte tenu de la grande quantité d'énergie (principalement de pétrole et de gaz) nécessaire pour les faire pousser et pour traiter la biomasse *;

e. dans un monde où des centaines de millions de personnes souffrent toujours de la faim, il est moralement inacceptable de cultiver des plantes pour alimenter les machines des autres êtres humains qui sont déjà riches et bien nourris ; les hausses enregistrées dans la période allant de mars 2007 à mars 2008 dans les prix du maïs (+31%), du riz (+74%), du soja (+87%) et du blé (130%) sont au moins partiellement imputable à l'utilisation croissante de terres pour la production agricole de biocarburants. Il vaudrait mieux produire de l'éthanol à partir de cellulose (bioéthanol de deuxième génération) extraite de certains types de plantes qui poussent dans des terrains vagues. Mais ce processus est encore en phase d'expérimentation.

* Le 29 février 2008, la revue Science a publié un article montrant que la production de biocarburants, plutôt que réduire, les émissions mondiales de gaz à effet de serre les a au contraire augmentée. Cela est dû à plusieurs facteurs, y compris l'exploitation des forêts en Amérique du Sud pour faire place à la culture de soja ; ce dernier, en particulier aux États-Unis, est peu à peu remplacé par le maïs, qui bénéficie d'un fort soutien gouvernemental pour la production de bioéthanol. Dans la pratique, on a affaire à une réaction en chaîne incontrôlée.

Chacun de ces arguments nécessiterait une étude de longue durée, même si le secteur est en développement tumultueux et n'attend pas. De telles recherches sont en cours afin d'obtenir le biobutanol par des processus de fermentation bactérienne, et le biodiesel à partir d'algues et même de graisses animales.

Le développement des biocarburants présente certainement des perspectives intéressantes, mais ils ne pourront probablement avoir qu'une petite contribution à la résolution du problème énergétique. On estime que l'Europe et les États-Unis, s'ils voulaient remplacer seulement 5% de leur consommation d'essence et de diesel par des biocarburants produits avec les technologies actuelles, devraient utiliser pour cela 20% de leurs terres agricoles.

L'Union européenne a récemment décidé que d'ici 2020 les biocarburants doivent contribuer à hauteur de 10% dans les carburants pour les transports, mais un déclaration de la Royal Society anglaise soutient que cette proposition est irréalisable.

Photosynthèse artificielle

Au début du siècle dernier, lorsque le pétrole et le gaz naturel n'était pas encore entré dans l'usage courant, le développement industriel et social s'est principalement fondé sur la consommation de grandes quantités de charbon, avec ses problèmes de pollution atmosphérique.

Certains scientifiques se demandent même pourquoi l'homme pour satisfaire ses besoins croissants en énergie, devrait faire usage de l'énergie solaire fossile impure plutôt que de l'énergie solaire propre et abondante qui nous arrive en permanence du Soleil. Parmi les scientifiques qui ont joué un rôle important dans ce questionnement on trouve Ciamician Giacomo, professeur à l'Université de Bologne, dont le département de chimie porte aujourd'hui le nom.

En 1912, une conférence intitulée « La photochimie de l'avenir », présentée à New York lors du huitième Congrès International de Chimie Appliquée, par Ciamician a abordé le problème de l'énergie dans des mots qui frappent par leur clairvoyance. Il a dit par exemple :

« La civilisation moderne est la fille du charbon : l'homme s'en est servi et s'en sert avec une avidité croissante et une insouciante prodigalité pour la conquête du monde. La Terre possède encore d'énormes réserves, mais elles ne sont pas inépuisables. Nous devons penser à l'avenir. ».

Fasciné par la capacité des plantes à utiliser la lumière solaire, Ciamician prédit le jour où leur secret serait dévoilé et pourra être utilisé par l'homme pour résoudre le problème de l'énergie :

Des forêts de tubes de verre et des serres de toutes tailles seront exposés au soleil des déserts et dans ces dispositifs transparents se produiront les processus photochimiques dont les plantes avaient jusque-là le secret, mais que l'industrie humaine a été capable de voler, les rendant beaucoup plus productifs, parce que la nature a tout son temps, alors que l'humanité est pressée. Et si vous plongez dans l'avenir lointain où le charbon sera épuisé, ce ne sera pas la fin de la civilisation parce que la vie et la civilisation dureront aussi longtemps que brillera le Soleil.

Si au charbon, qui à l'époque était pratiquement le seul combustible utilisé, on substitue les combustibles fossiles, le raisonnement de Ciamician est d'une totale actualité. La nervosité, l'anxiété de notre civilisation - que Ciamician a pressenti - provient de la nécessité d'affronter des problèmes qui sont aujourd'hui devenus trop complexes pour être traités facilement : la pollution de la biosphère, le réchauffement climatique, l'inégalité croissante dans la répartition de la richesse, la croissance démographique, l'appauvrissement général des ressources naturelles.

Le secret de la photosynthèse naturelle a été volé, mais l'humanité, qui est aujourd'hui toujours plus pressée n'a pas encore pu l'utiliser pour produire des combustibles artificiels à travers la conversion de l'énergie solaire. La réalisation du rêve de Ciamician est aujourd'hui l'un des défis les plus importants auxquels fait face la science pour sortir de la crise énergétique et écologique qui s'annonce. Les recherches sur la photosynthèse artificielle visent à produire du carburant à partir de substances largement utilisées comme l'eau et le dioxyde de carbone. L'eau devrait être scindée en hydrogène et en oxygène, suivant la réaction :

$$H_2O \xrightarrow[\text{molécule artificielle}]{\text{lumière du Soleil}} H_2 + 1/2\, O_2$$

Le dioxyde de carbone pourrait au contraire être réduit en méthanol, avec production concomitante d'oxygène. Mais parce que ce processus est déjà très compliqué sur le papier, l'attention des chercheurs s'est concentrée sur l'eau et sa division en hydrogène et en oxygène, pour créer un cycle fermé pour la production d'énergie.

On part de l'eau, une molécule inerte, à faible contenu énergétique mais abondante sur Terre, et on injecte de l'énergie sous forme de lumière du Soleil, entraînant la séparation des deux composants, l'hydrogène (combustible) et l'oxygène (comburant), comme le montre la figure 20.

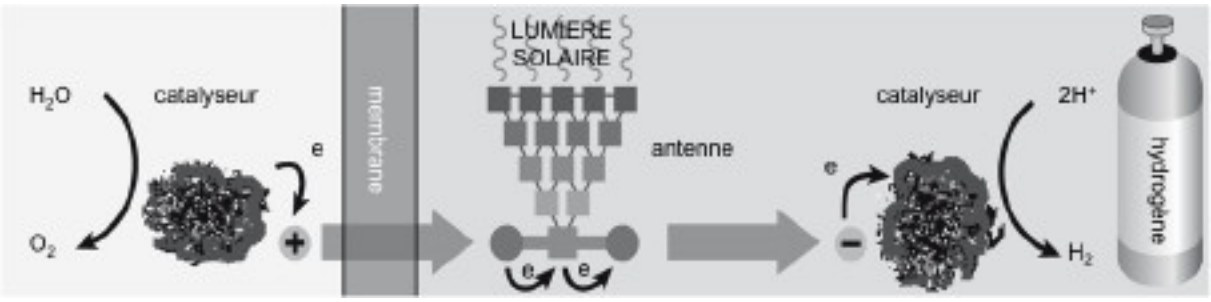


Figure 20. Schéma du processus de photosynthèse artificielle.

Lorsque ces deux éléments sont recombinés dans un processus de combustion ou dans une pile à combustible, ils produisent de l'énergie thermique ou électrique, en rendant l'énergie stockée et en formant de l'eau comme unique produit. Cependant pour diviser l'eau il faut faire intervenir des substances capables d'absorber la lumière et de catalyser la réaction comme le fait la chlorophylle dans le processus naturel.

Certains objectifs partiels ont récemment été atteints, mais il reste beaucoup de problèmes à résoudre, par exemple pour trouver des catalyseurs capables de faire passer les processus impliqués dans la production d'hydrogène et d'oxygène, à la fin de la chaîne de réactions. Cela prendra plusieurs années et les travaux de nombreux scientifiques pour parvenir à la production d'hydrogène par photochimie de l'eau. Pendant ce temps-là, toutefois, les moyens de communication de masse, on déjà transformé l'hydrogène en légende.

Le mythe de l'hydrogène

Selon les journaux, l'hydrogène permettra de résoudre tous les problèmes énergétiques : ce sera une forme d'énergie abondante, propre et même « démocratique ». Même dans les cercles scientifiques, mal informés, et dans ceux des politiciens qui ne sont documentés que par les journaux, les discours que l'on entend sont plus ou moins comme ceci : aujourd'hui, nous sommes contraints d'utiliser des combustibles fossiles qui sont en voie de disparition et qui produisent du dioxyde de carbone responsable de l'effet de serre, mais dans quelques années, nous pourrons enfin utiliser l'hydrogène, qui ne pollue pas parce qu'il ne produit que de l'eau.

Malheureusement, les choses sont plus compliquées. La soi-disant « économie de l'hydrogène » est en fait un problème très complexe qui a peu de chances de trouver une solution rapidement. Voyons pourquoi.

L'hydrogène utilisé pour produire de l'énergie est l'hydrogène moléculaire, le gaz de formule chimique H_2. On sait depuis plus de deux cents ans, depuis Lavoisier que lorsque l'hydrogène brûle il dégage de l'énergie, de la même manière que le gaz naturel, le pétrole et le charbon dégagent de l'énergie en brûlant. La grande différence est que la combustion de combustibles fossiles produit du dioxyde de carbone, tandis que celle de l'hydrogène ne produit que de l'eau:

$$H_2 + 1/2\ O_2 \longrightarrow H_2O + \text{énergie}$$

Entre l'hydrogène et les combustibles fossiles il y a aussi une autre différence fondamentale qui est souvent oubliée. Les combustibles fossiles sont des ressources d'énergie primaire, qui se trouvent dans des gisements naturels qui doivent être extraits pour pouvoir être utilisés. Sur terre il y n'y a pas de gisements d'hydrogène moléculaire !

Ce qui est abondant dans la nature c'est l'hydrogène avec d'autres d'autres éléments, par exemple, avec l'oxygène des molécules d'eau. Souvent, les journaux disent aussi que « l'eau sera le charbon de l'avenir », et tout aussi souvent, cette phrase est accompagnée d'une citation de l'ingénieur Cyrus Smith dans l'Île Mystérieuse de Jules Verne (1875) :

« Oui, mes amis, je crois qu'un jour l'eau sera employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. »

L'eau ne peut vraiment pas, même vaguement, être comparée au charbon, comme nous le confirme le bon sens. Contrairement au charbon, l'eau ne peut pas alimenter le feu, au contraire elle l'éteint. L'eau ne pas « brûler » car elle est déjà « brûlée ». Brûler, en fait, correspond à la combinaison d'une substance avec l'oxygène : dans l'eau d'hydrogène est déjà combiné avec l'oxygène.

Quelques journalistes, toutefois, ne se résignent pas. Même s'ils admettent qu'il n'y a pas d'hydrogène atomique, ils estiment qu'il peut être facilement extrait de l'eau. Pas du tout : si vous voulez produire de l'hydrogène à partir de l'eau, par exemple par la voie électrochimique l'électrolyse, il faut dépenser de l'énergie :

$$H_2O + \text{énergie} \longrightarrow H_2 + 1/2\ O_2$$

exactement la même quantité d'énergie que peut alors produire l'hydrogène sous forme de chaleur quand il brûle avec l'oxygène pour donner de l'eau ! En conclusion, l'hydrogène moléculaire n'est pas une source primaire d'énergie, par le simple fait qu'il n'y en a pas sur la Terre. Pour pouvoir l'utiliser il faut d'abord dépenser de l'énergie pour le produire.

On ne peut même pas dire que l'hydrogène est propre. En fait, il est « propre » ou « sale », selon que la source d'énergie qui est utilisée pour le produire est propre ou sale. Utiliser comme combustible l'hydrogène obtenu à partir à partir du gaz naturel n'offre aucun avantage en ce qui concerne l'impact environnemental, car le procédé de fabrication produit la même quantité de dioxyde de carbone que la combustion directe du méthane utilisé. De même, si on utilise l'énergie nucléaire pour produire de l'hydrogène, on a tous les problèmes liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire.

La perspective changera complètement si on trouve un moyen de produire de l'hydrogène à partir de l'eau en utilisant une source d'énergie abondante,

renouvelable et non polluante comme le solaire. On pourrait produire par électrolyse de l'hydrogène en utilisant l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques, mais pour l'instant ce n'est pas une filière qui a atteint le seuil de rentabilité économique. On pourrait utiliser la photosynthèse artificielle, une méthode qui, cependant, comme nous l'avons vu, en est encore au stade des études fondamentales. La transition à partir d'une économie énergétique à base de combustibles fossiles, vers une énergie basée sur l'hydrogène requiert des progrès décisifs dans les méthodes de conversion de l'énergie solaire.

En tout cas, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire, et c'est seulement quand il sera produit économiquement en quantité suffisante qu'il pourra devenir un vecteur énergétique, et avant il faudra encore résoudre d'autres problèmes liés au fait que le gaz est difficile à transporter, à stocker et à utiliser. Il est donc prématuré, voire contre-productif de promouvoir l'économie de l'hydrogène et de réaliser de dispendieux prototypes de démonstration de véhicules à hydrogène qui sont de toutes les expositions automobiles internationales.

Un gros avantage de l'hydrogène comme vecteur d'énergie est qu'il peut être échangé directement avec un autre vecteur majeur déjà largement utilisé, l'électricité. En effet, car de la même façon qu'avec l'électricité on peut obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau, inversement en utilisant des dispositifs appelés piles à combustible, l'hydrogène et l'oxygène peuvent produire de l'électricité. En n'oubliant pas toutefois, que pour utiliser l'hydrogène ou l'électricité il faut d'abord les « fabriquer ».

En tout cas, même si cela prend un certain temps, la production d'hydrogène par l'énergie solaire est la meilleure solution qui promet de produire du combustible pour le transport.

Chapitre 8

Énergie de l'air, l'eau et la terre

Il faut toujours agir comme si nos actions faisaient la différence. Agissons.
William James

Le 31 mars 2007 il soufflait en Espagne une brise agréable. Ce bulletin météo serait totalement insignifiant, si par cette journée de printemps, la production espagnole d'électricité éolienne a dépassé, bien que légèrement, la production électronucléaire. Rien de tel ne s'était jamais produit auparavant dans aucun pays.

Changer le vent

La production d'électricité éolienne a connu une croissance impressionnante ces derniers temps. En 2007, le total mondial de puissance installée a augmenté de 74 000 à 94 000 MW, comme le montre la Figure 21. Pour la plupart, les installations sont en Europe et totalisent 57 000 MW dont 22 000 MW dans la seule Allemagne, qui est plus que jamais le leader mondial.

En Europe, également en 2007, l'augmentation de la capacité éolienne (+ 8504 MW) a dépassé celle des nouvelles centrales électriques au gaz (+ 8226 MW), tandis qu'ont diminué à la fois la production d'électricité des centrales au charbon (-750 MW) et celle du nucléaire (-1203 MW).

L'Europe projette d'installer un supplément de 180 000 MW de puissance éolienne d'ici 2020 pour répondre à 13% de la demande d'électricité continentale et d'ainsi de contribuer de façon décisive à l'objectif ambitieux de produire 20% de toute son énergie à partir de sources renouvelables à cette date.

La production d'énergie éolienne a été l'un des éléments majeurs du secteur de l'énergie durant les trente dernières années et étant donné sa taille, nous ne pouvons plus aujourd'hui la considérer comme une alternative, mais bien plutôt comme une source classique d'énergie.

Avant d'installer un parc éolien, ou ferme éolienne, il faut bien sûr en choisir l'emplacement avec soin. On dispose maintenant de cartes très précises des vents dans le monde qui montrent que la plupart des sites favorables sont les côtes de la mer du Nord, la partie méridionale de l'Amérique du Sud, les Grands Lacs et les Grandes Plaines entre les États-Unis et le Canada, la Tasmanie.

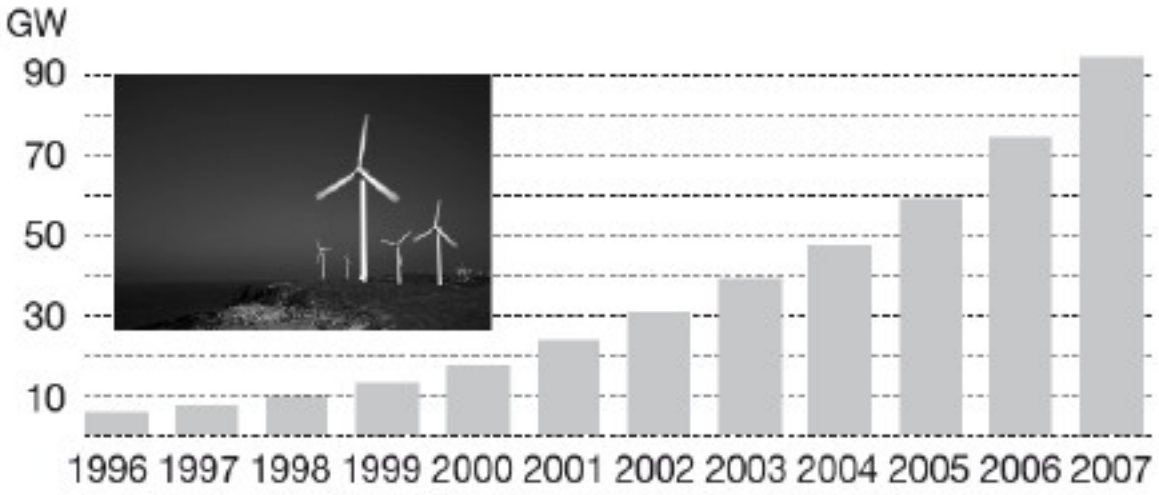


Figure 21. Développement de la puissance éolienne installée dans le monde entre 1996 et 2006.
Source : Global Wind Energy Council, 2008. Photo: Soca /Shutterstock.

Plus que des vents forts, il faut disposer de vents dont la vitesse et la direction soient constantes, avec une vitesse optimale d'environ 7 m / s. On estime que les régions pour lesquelles, à 80 m au-dessus du sol, la vitesse annuelle moyenne du vent est supérieure à 7 m / s ont, à elles seules, un potentiel éolien de 70 TW, ce qui correspond à plus de cinq fois la demande actuele de puissance moyenne mondiale d'énergie (et pas seulement de l'électricité!).

C'est donc un immense potentiel, qui ne sera sans doute jamais pleinement exploitée, mais qui contribuera certainement de manière significative à la transition énergétique dans le secteur de l'électricité.

Comme énergie primaire, le vent est intermittent sur une base quotidienne et saisonnière. Les réseaux de transport et de distribution qui sont connectés aux fermes éoliennes doivent donc être préparés à un flux électrique intermittent, typiquement de moyenne et haute tension. Les réseaux de distribution des pays développés sont actuellement prévus pour une charge inverse : ils doivent conduire l'électricité produite par un petit nombre de grandes centrales électriques ayant un flux prévisible et contrôlée. Le basculement vers une production de nombreux systèmes de petite taille, éoliens et autres nécessitent des modifications adéquat et coûteux pour les réseau de distribution d'électricité.

Comme la source d'énergie est intermittente, installer 100 MW d'éoliennes ne signifie pas de pouvoir disposer de 100 MW d'électricité en continu. La capacité annuelle efficace et effective est estimée à 45% de la capacité maximum de production dans les zones les plus éventées et à une moyenne de 30% au niveau mondial. En termes d'autres, pour disposer de 100 MW il faut en réalité installer 250 MW. Il faut dire, cependant, qu'aucun système de production d'électricité ne fonctionne à 100% du temps disponible, en raison des nécessaires interruptions d'entretien, de casses et d'autres facteurs.

Le problème de l'intermittence peut être atténué par la fiabilité croissante des

prévisions météorologiques et par l'augmentation du nombre de sites de production. Le déploiement d'un nombre toujours plus grand de fermes éoliennes raccordées au réseau dans des régions les plus éloignées possibles, augmentera la stabilité du système, parce que la répartition moyenne des vents sur de longues distances est plus homogène, ce qui modère l'impact des variations locales. S'appuyant sur cette idée se développent des plans pour créer un super-réseau paneuropéen, allant d'installations éoliennes offshore en mer Baltique, en mer du Nord, dans la Manche et de l'Atlantique à la Méditerranée occidentale, en passant par la péninsule ibérique.

Outre l'intermittence souvent évoquée il faut aussi parler des autres problèmes attribués aux éoliennes : le bruit des pales et l'impact possible des oiseaux contre ces objets en mouvement. En fait, le bruit est un problème qui a déjà été affronté et résolu : les derniers développements technologiques ont fait des éoliennes des dispositifs plus silencieux que le sifflement du vent. Quant aux oiseaux des études autorisées indiquent que le risque est négligeable pour presque toutes les espèces, à l'exception possible des chauves-souris (qui ne sont pas des oiseaux). En outre, il est estimé que dans le monde chaque année, des centaines de millions d'oiseaux perdent la vie par impact avec des véhicules en mouvement, des bâtiments et des lignes électriques à haute tension. Le développement de fermes éoliennes modernes ne modifiera pas sensiblement les chiffres actuels.

Les quelques défauts de l'énergie éolienne sont contrebalancés par plusieurs avantages. Une centrale éolienne de 10 MW, qui assure les besoins d'électricité de 4.000 ménages, en moyenne européenne, peut être construit en seulement deux mois. Dans un temps si court un parc d'éoliennes peut être transféré sur un autre site, avec une simplicité absolument impensable pour les autres centrales. Et pour renforcer le parc éolien il n'est pas nécessaire de s'étendre : il suffit de remplacer les pales existantes par des pales plus puissantes.

Une ferme éolienne moderne nécessite un entretien minime et au moment du démantèlement les matériaux utilisés peuvent être recyclés presque intégralement. On récupère en quelques mois, l'énergie investie dans sa construction, l'énergie éolienne détient le leadership parmi toutes les technologies électriques en termes de temps de récupération.

Les centrales éoliennes impliquent une moindre utilisation des terres et l'agriculture peut continuer normalement dans les sols sur lesquels elles sont installées. En outre, les éoliennes n'ont pas besoin d'eau pour le refroidissement, donc ne rejettent pas de pollution thermique dans l'environnement.

En Allemagne, le coût des externalités de santé associées à la production d'énergie éolienne est estimé à 0,05 centime d'euro par kWh, alors que pour la production d'électricité à partir du charbon et du gaz le coût est respectivement 100 et 40 fois plus grand.

En 2007, le déploiement de parcs éoliens européens a évité l'émission de 370 millions de tonnes de CO_2. En ce qui concerne la question de la sécurité pour la communauté, le problème ne se pose même pas : Il est peu probable en effet que,

même avec les pires intentions, quelqu'un conçoive des actions qui mettent en danger la sécurité publique en ciblant les parcs éoliens.

Plus de 80% des éoliennes produites dans le monde sont fabriquées en Europe, employant quelque 80 000 salariés (plus du double des employés actuels de Fiat Auto, pour donner une idée), en 2020 le nombre de salariés s'élèvera a plus de 200 000.

L'Italie, après des années d'impasse préoccupante, tente de rattraper son retard dans cette industrie qui a un potentiel énorme pour le développement dans les décennies à venir. À la fin de 2007, la puissance installée en Italie s'élève à 2730 MW, nous donnant le sixième rang dans le monde. En 2006, le parc éolien italien a produit 2791 GWh, soit 0,9% de la consommation d'énergie globale 4,1% de la consommation à des fins domestiques. Pour un pays qui ne dispose pas de grandes ressources de vent, c'est un résultat qui commence à être encourageant.

L'impact esthétique des éoliennes est l'un des facteurs qui ont ralenti leur développement en Italie. C'est certainement un aspect à prendre en compte, mais nous pensons que les critiques et les protestations sont souvent spécieuses. Le territoire italien, est parsemé de bâtiments de tous types et les abus dans le pays sont tels qu'il est presque impossible de prendre une photo qui ne comprennent pas un pylône à haute tension, une antenne de téléphone relais ou quelque autre merveille d'esthétique. Les moulins à vent modernes ne salissent pas d'une manière décisive le paysage. Et puis les goûts changent parfois, peut-être un jour trouvera-t-on agréable l'aspect de ces parcs éoliens, notamment en raison de l'important avantage qu'ils apportent pour le climat et la santé.

Les pays dominants en énergie éolienne sont actuellement le Danemark, l'Espagne et l'Allemagne, qui couvrent respectivement 20%, 9% et 7% de leur demande nationale d'électricité avec cette technologie. Grâce à leurs entreprises ces pays dominent le marché mondial des équipements de production ; la Chine et les Etats-Unis se sont maintenant lancé dans la course avec une grande détermination, dans une industrie qui continue à évoluer.

Au début des années quatre-vingt une hélice d'éolienne typique a un diamètre de 15 mètres et la puissance installée est de 50 kW. Il existe aujourd'hui des modèles qui vont jusqu'à 125 mètres de diamètre avec une capacité de 6000 kW (6 MW). On conçoit actuellement des éoliennes à 10 MW pour les fermes offshores au large des côtes caractérisées par des eaux peu profondes.

Au cours des deux dernières décennies, comparativement à une augmentation de plus de 100 fois de la puissance d'une éolienne, il y a eu une diminution de 80% du coût de production d'électricité, donc le prix de l'énergie éolienne est devenue compétitive avec celle des centrales thermiques. En outre, le coût du pétrole, du gaz ainsi que celui de l'uranium a augmenté de plus de 10 fois au cours de la dernière décennie, tandis que le coût du vent est resté à la valeur qu'il a toujours eu : zéro.

Et c'est dans cette gratuité qu'est la force perturbatrice du vent (et d'autres sources renouvelables) : le « carburant » ne coûte rien et il est utilisable pour une durée illimitée, mais aussi les ressources disponibles en sont connues avec une grande précision dans tous les recoins de la Terre. Grâce au progrès technologique, par conséquent, le coût de l'énergie éolienne ne peut que décroître. C'est pourquoi aujourd'hui les groupes financiers internationaux investissent beaucoup d'argent dans le vent et d'autres sources d'énergie renouvelables, plutôt que dans les secteurs traditionnels utilisant des combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, qui souffrent de ce point de vue d'énormes incertitudes.

L'eau : entre passé et futur

Il y a soixante-dix ans, l'Italie était un pays très vertueux du point de vue de l'énergie : l'électricité provenait presque exclusivement de sources renouvelables. Sur les 15,5 GWh produits en 1938, 14,6 GWh provenaient de ce que la propagande de l'époque appelait « la houille blanche », qui est d'origine hydraulique en provenance des Alpes et des bassins des Apennins. Sur cette base, dans les années trente, les plus imprudents partisans du projet irresponsable de l'autarcie ont proposé des projets bizarre comme le labourage électrique. Le fait demeure que l'exploitation des chutes d'eau pour produire de l'énergie mécanique ou de l'électricité a été d'une importance vitale pour l'industrialisation italienne des XIXe et XXe siècles. Par exemple, le développement de l'industrie textile à Biella ou d'acier à Terni est inextricablement lié à la disponibilité sur place de cette source d'énergie.

Aujourd'hui a consommation électrique italienne est vingt-deux mille fois plus élevée qu'en 1938 (320 000 GWh) et quelques centrales hydroélectriques des années trente fonctionnent encore parfaitement. La source hydraulique couvre actuellement 15% de la consommation intérieure d'électricité, un taux très élevé pour un pays avancé (en Allemagne elle ne couvre que 3% et aux États-Unis 7%). Dans certains pays africains ou sud-américains elle reste fermement installée à la première place des source d'électricité. Au Brésil elle représente plus de 80% de la production.

Il y a dans le monde aujourd'hui 800 000 barrages hydroélectriques en activité dont 45 000 de grande taille, ayant plus de 15 mètres de haut. L'hydroélectricité fournit actuellement 2,2% de l'énergie primaire dans le monde et 16% de l'électricité, cette part est légèrement plus élevée que celle de l'énergie nucléaire. En corollaire de cette importante contribution, les usines hydroélectriques occupent 60% de la superficie totale des infrastructures énergétiques. Les bassins de collecte de l'eau couvrent globalement environ 300 000 km2, soit la superficie de l'Italie. C'est donc une technologie très envahissante.

En général, après un boom dans les années soixante et soixante-dix, la construction de grandes centrales hydroélectriques s'est considérablement ralentie, parce que les problèmes créés par cette technologie sont plus importants que prévu. La construction de barrages a des conséquences majeures sur les populations et l'environnement : exodes forcés des populations des zones

inondées, excavation d'énormes quantités de matière, changements dans le microclimat local, danger pour la population en aval du barrage, appauvrissement de la biodiversité, bouleversement de la faune des rivières, propagation de maladies comme le paludisme, transmis par des parasites qui se développent dans l'eau de rivière, réduction radicale de la vitesse moyenne d'écoulement des rivières avec augmentation de la pollution, sédimentation des matières au fond des lacs de retenue avec une diminution progressive de la fourniture d'énergie électrique et des coûts d'entretien élevés, diminution de la fertilité des terres dans la vallée.

Des études récentes montrent également que les réservoirs hydroélectriques dans les régions tropicales peuvent devenir de grands producteurs de gaz à effet de serre (CO_2, CH_4) en raison de la décomposition des matières organiques dans leurs eaux chaudes et stagnantes. Dans quelques cas, il a même été calculé que la production équivalente d'électricité avec des centrales thermiques serait moins dommageable, du point de vue de la production de gaz à effet de serre !

Ces dernières années, partout dans le monde, on a commencé à détruire les installations hydroélectriques les plus anciennes, celles construites dans la première moitié du XX^e siècle. Ces opérations sont très complexes et très couteuses, mais elles sont rendues nécessaires pour des raisons de sécurité et de restauration de l'environnement. Aux seuls États-Unis, le taux de démantèlement des grandes centrales hydroélectriques a dépassé le taux de construction depuis des années.

L'énergie des chutes d'eau a été largement utilisée en Europe et en Amérique du Nord, où l'on estime que plus de 70% du potentiel exploitable est déjà opérationnel. En Afrique et en Asie, l'exploitation de l'énergie hydroélectrique se situe entre 10 et 25% du potentiel, et sans que cela soit un hasard c'est là que se concentrent les quelques projets d'installations majeures.

Le plus connu est le barrage des Trois Gorges en Chine sur le fleuve Yangtze. Il s'agit d'un énorme projet qui mettra à la disposition du géant économique asiatique un approvisionnement de puissance électrique de 22 500 MW (pour donner une idée, cette valeur est supérieure à la puissance électrique totale installée en Autriche). Pour sa mise en œuvre il a fallu inonder une superficie de 600 km de long sur une largeur moyenne de 2 km, démolir 23 villes, déplacer de force 1,3 millions de personnes et supprimer des sites d'un grand intérêt archéologique.

Les autorités chinoises comptent aussi sur ce projet pour contrôler les inondations catastrophiques qui affectent périodiquement les bassins fluviaux. Toutefois, l'impact environnemental est préoccupant et il se manifeste déjà de différentes façons, par exemple, par des glissements de terrain et les autorités chinoises tentent de se mettre à l'abri pour éviter que cette important ouvrage d'art ne se transforme symboliquement en un boomerang écologique et économique affectant l'imaginaire populaire.

Malheureusement, cette approche par méga-projets portant peu d'attention à

l'impact sur l'environnement se répand en Afrique, où les entreprises chinoises exploitent leurs entreprises avec de gros bénéfices en soutenant les régimes qui ne sont pas particulièrement sensibles aux questions environnementales et aux droits de l'homme.

Le développement impétueux en Occident de centrales hydroélectriques, dicté par les besoins du boom économique d'après la Seconde Guerre mondiale, a provoqué quelques désastres.

Dans la soirée du 9 octobre, 1963, à la suite à d'essais du barrage près de Vajont Longarone en Italie, un glissement de terrain a rompu la montagne Toc et des dizaines de millions de litres d'eau et de boue ont submergé la Valle del Piave, provoquant près de 2000 morts. Et cette tragédie inhumaine et évitable devrait rester un rappel permanent que l'homme ne doit pas se laisser fasciner par un « développement économique » follement avide et insoucieux des lois de la nature.

Malgré de nombreux problèmes, il faut cependant souligner que l'hydroélectricité a de nombreux mérites. Premièrement, il s'agit d'une technologie relativement simple et économiquement intéressante, malgré de longs délais de construction et la nécessité de gros investissements, les coûts de production d'électricité sont parmi les plus bas en valeur absolue.

Les réservoirs hydroélectriques sont le moyen idéal de stocker de l'énergie qui puisse servir en cas de besoin. Dans de nombreux pays, dont l'Italie, il est monnaie courante de remplir par pompage les retenues d'eau la nuit en utilisant l'énergie thermoélectrique produite en excès, offrant ainsi une réserve pour le jour suivant qui peut être mobilisée en quelques secondes aux heures de pointe de la demande électrique.

Enfin, les réservoirs hydroélectriques sont souvent utilisés non seulement pour produire de l'électricité, mais aussi pour fournir de l'eau potable et d'irrigation. Plus généralement ces bassins sont un outil utile pour contrôler les ressources en eau, particulièrement en période de sécheresse ou de fortes pluies.

Globalement, il n'y a aucun doute que l'énergie hydraulique a grandement contribué à éviter l'émission de polluants et de gaz à effet de serre. Si on remplaçait cette énergie par celle produite par des centrales thermiques, on verrait une augmentation annuelle des émissions de carbone de +15% et de soufre de +35%.

Les perspectives d'expansion de l'énergie hydroélectrique s'orientent vers le « small is beautiful », à savoir les centrales de moins de 10 MW, parfois même de quelques kW, pouvant exploiter des cours d'eau à débit faible mais constant.

Cette possibilité est intéressante non seulement pour les pays riches, où il est difficile de construire de grandes installations nouvelles, mais aussi pour les zones rurales non connectées au réseau électrique dans les pays en développement.

Enfin, l'énergie hydraulique peut être stockées indéfiniment et constitue donc une

option attrayante pour soutenir et intégrer les technologies renouvelables qui produisent par intermittence, comme l'énergie éolienne et le photovoltaïque. En Italie, nous avons actuellement 170 MW de petites centrales hydroélectriques en construction ou à l'étude.

Terres brûlantes

Le 4 juillet 1904 est une date importante dans l'histoire de l'énergie. Ce jour-là pour la première fois, cinq lampes se sont allumées alimentées par un générateur électrique actionné par la vapeur des entrailles de la terre. Le créateur de la brillante performance était le prince Ginori Piero Conti, un jeune Toscan qui avait fini par mener à bien une entreprise commencé il y a longtemps par le grand-père de son père, Francis Larderel.

Larderel, descendant d'une famille noble d'origine française qui s'était installée en Toscane à l'époque de Napoléon, avait été fasciné sur les collines métallifères de la province de Pise par les boues blanchâtres étranges d'acide borique qui se forment autour des geysers naturels qui jaillissent du sous-sol. Cet acide borique est, une substance utilisée depuis l'époque étrusque pour la préparation des émaux et vernis. Avec l'acide borique la famille Larderel construisit une première grande fortune. Un siècle plus tard, l'héritier Ginori Conti, créa une deuxième société, encore plus grande, utilisant ces phénomènes spectaculaires de la nature pour produire de l'énergie sur une grande échelle.

La structure interne du vaisseau spatial Terre est caractérisée par trois couches concentriques d'épaisseurs différentes : la croûte, le manteau et le noyau.

Le noyau est le cœur de notre planète, une sorte d'énorme boule de fer et de nickel avec un rayon d'environ 3500 km qui se compose de deux zones : l'extérieure qui est fluide et a une température moyenne de 3000 ° C, l'intérieure a la température de 4000 ° C, mais est solide en raison de l'énorme pression qui s'exerce sur elle.

La croûte est la couche extérieure la plus mince, avec une épaisseur moyenne d'environ 30 kilomètres à travers les continents et de 5 km sous les océans. Avec la partie extérieure du manteau elle forme la lithosphère, divisée en dix grandes plaques de formes et de tailles variées, qui peuvent être assimilés à des radeaux qui flottent sur le manteau. Le frottement au niveau des frontières entre les plaques est à l'origine des tremblements de terre.

Le manteau est la couche intermédiaire entre la croûte et le noyau. Il est épais de 2900 km et est composé de roches riches en fer et en magnésium, qui sont aussi soumises à des pressions et des températures élevées. Les volcans sont des cheminées naturelles qui mettent en communication le manteau et la surface.

Les entrailles de la Terre sont chaudes et lorsqu'on descend en profondeur la température moyenne augmente de 30° C par kilomètre.

La chaleur endogène de la planète est principalement due à deux phénomènes, le mouvement de convection du manteau, d'une part, qui redistribue vers l'extérieur la

chaleur qui se dégage du noyau, et la désintégration des isotopes radioactifs (en particulier l'uranium, le thorium et le potassium) qui sont contenus dans la croûte, d'autre part.

La chaleur interne de la planète atteint la surface de la Terre avec une puissance moyenne d'environ 0,06 W/m2. Si on divise la surface de l'Italie par le nombre d'habitants on trouve que chaque italien dispose d'environ 5200 m^2, qui libèrent chaque année 2700 kWh de chaleur. Il s'agit d'un montant significatif, équivalent à 3 à 4 fois la consommation moyenne annuelle d'électricité de chaque italien.

En chaque point de la Terre la température est déjà très élevée, à des profondeurs relativement faibles. C'est le cas avec les vallées toscanes théâtre des entreprises des pionniers de l'énergie géothermique. Le champ de Larderello, qui tient son nom de son fondateur, couvre environ 200 km^2 et la température dans le sous-sol est supérieure à 300° C à 3000 mètres de profondeur.

La présence de roches chaudes à faible profondeur est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour obtenir une énergie exploitable à partir d'eau souterraine. Il est essentiel que ces poches de chaleur puissent entrer en contact avec de l'eau de pluie pénétrant profondément par une conformation favorable de la croûte terrestre, faite de fractures et de roches perméables. Cela permet de créer les conditions nécessaires pour générer les fluides utilisés dans tous les processus de production de chaleur et d'électricité sur une grande échelle, c'est à dire l'eau chaude et la vapeur. Ces fluides restent souvent bloqués sous terre et pour les extraire et les utiliser il faut forer des puits, en utilisant des technologies similaires à celles utilisées pour le pompage du pétrole et du gaz. Parfois, l'eau chaude et la vapeur trouvent une voie naturelle de sortie en créant des phénomènes spectaculaires, et même quelques fois agréables et curatifs, comme les sources chaudes, les soufflantes, les fumerolles et les geysers.

En fonction de conditions locales particulières, notamment la morphologie et la température du sous-sol, il se forme des réservoirs géologiques où, soit l'eau, soit la vapeur, est dominante. Les premiers sont beaucoup plus fréquent, l'eau peut y atteindre des températures supérieures à 300° C, tout en restant liquide en raison de la pression très élevée qu'elle subit. Lorsque le tue de forage atteint ces réservoirs l'eau remonte à la surface et est en partie transformée en vapeur, qui est envoyée dans des turbines pour produire de l'électricité.

Les gisements où la vapeur est dominante sont les plus précieux car la vapeur sèche qu'ils produisent peut être pratiquement envoyée directement dans les turbines. Le champ de Lardello est de ce type et il permet de produire une puissance électrique de 700MW, équivalente à celle d'une centrale thermique à combustible fossile ou à une centrale nucléaire. Le plus grand champ géothermique du monde, « les geysers » en Californie, produit près de 800 MW d'électricité.

Dans le monde aujourd'hui sont installés, en énergie géothermique, environ 9000 MW, principalement en Italie, aux USA, au Japon, aux philippines, en Amérique centrale et en Islande. Cette source d'énergie fournit environ 0,2% des besoins en

électricité de la planète, à des prix très concurrentiels par rapport aux sources traditionnelles.

Le secteur devrait connaître une forte croissance, compte tenu de son énorme potentiel. Une étude du MIT à Boston, qui fait autorité, a estimé en 2006 que les réserves géothermiques aux États-Unis disponibles à moins de 10 km de profondeur équivalaient à 130 000 fois la consommation actuelle, annuelle d'énergie primaire dans le pays tout entier. Toutefois, en tenant compte des impacts économiques, techniques et environnementaux, l'étude prévoit que d'ici 2050, l'énergie géothermique ne fournira que 10% de l'électricité aux États-Unis, une quantité qui peut encore apporter une contribution importante à la transition énergétique.

Les ressources géothermales sont renouvelables, mais uniquement si elles sont bien gérées. Jusque dans les années soixante-dix les gisements étaient simplement exploités, mais aujourd'hui la tendance est à la « culture ». Pour éviter que la vitesse d'extraction de fluides géothermiques dépasse la capacité naturelle de renouvellement par les eaux de pluie, de l'eau est réinjectée dans le sol. Il s'agit d'une opération complexe du point de vue technique, mais elle a permis de revitaliser les champs géothermiques, qui montraient des signes de ralentissement de la production.

Naturellement, cette technologie présente également des problèmes. Le plus évident est lié à la sensibilité extraordinaire de notre nez à des substances sulfurées, qu'on perçoit à des concentrations infinitésimales. Le sulfure d'hydrogène généré par la décomposition des déchets organiques dans le sous-sol est la cause de l'odeur désagréable « d'œufs pourris », qui accompagne souvent les phénomènes géothermiques.

D'autres questions essentielles se rapportent aux affaissements de terrain (subsidence), l'agressivité chimique des fluides géothermiques, le bruit et l'impact visuel des grandes centrales.

Tous ces problèmes ont été largement résolus ou fortement atténués et, aujourd'hui, la principale critique de la technologie est le coût élevé de l'exploration et de la phase de développement d'un champ géothermique qui peut représenter jusqu'à deux tiers du coût total, parfois sans aboutir à des résultats concrets.

Un autre problème est strictement thermodynamique : la production d'énergie géothermique convertit de l'énergie de faible valeur (chaleur) en énergie de haute qualité (électricité) et le rendement de conversion est par conséquent assez faible. Dans les gisements Italiens, avec une température moyenne de la vapeur à 220° C et 10 atmosphères de pression, le rendement de conversion en l'électricité ne peut pas excéder 20%.

L'utilisation la plus connue de l'énergie géothermique est la production d'électricité. La chaleur géothermique est également utilisée pour le chauffage dans l'industrie et les ménages. En utilisant des sources à plus basse température (30 à 150 ° C) on chauffe des élevage de poissons, des piscines, on fait du chauffage urbain et de

serres et on assure le séchage de produits agricoles et de bois.

Dans la capitale islandaise Reykjavik se trouve la plus grande centrale de chauffage urbain du monde qui assure le chauffage résidentiel de 160 000 personnes par l'énergie géothermique. Globalement, les utilisations directes de la chaleur endogène de la Terre, offre aujourd'hui une capacité de plus de 16 000 MW.

Ces dernières années on a connu une forte croissance de l'utilisation des pompes à chaleur géothermiques, des appareils électriques qui échangent de la chaleur avec le sol ou la nappe phréatique à proximité des bâtiments. Ils exploitent le fait que déjà à quelques mètres de profondeur, la température de la terre reste quasiment constante tout au long de l'année, comme le savent très bien ceux qui ont une bonne cave. Pendant l'hiver, le sol a une température plus élevée que l'air extérieur, tandis qu'en été, la situation est inversée. On dispose donc toute l'année, d'un réservoir naturel qui permet de réchauffer ou de refroidir les bâtiments au prix d'une très faible consommation électrique.

La géothermique est une branche de la géophysique à la fois très ancienne et très avancée, qui a besoin du soutien de plusieurs branches de la chimie, de la physique et de l'ingénierie. L'Italie en est le leader mondial, grâce à une expérience très ancienne sur le terrain. Les perspectives ouvertes par la recherche et le développement d'aujourd'hui se situent dans la géothermie stimulée qui consiste à extraire de la chaleur du sous-sol jusqu'à 10 000 m de profondeur (la profondeur plafonne actuellement à 5000 m) dans les sols à faible perméabilité où on provoque une porosité par fissurage sous pression. Cela ouvrirait de grandes possibilités nouvelles d'utilisation de l'énergie géothermique dans le monde, pas seulement dans ces zones très limitées dans lesquelles la nature l'a rendu si facile à exploiter.

La force des marées

Les étendues de neige dans un beau paysage alpin en hiver constituent une forme d'énergie potentielle qui, dans les mois plus chauds, sera libérée, et pourra être en partie récupérée par l'alimentation des centrales hydrauliques. Le dégel saisonnier est un processus assez lent et graduel qui peut être exploités à des fins utiles. Mais quand la neige dévale soudainement dans la vallée en avalanche, il n'existe aucun moyen de récupérer toute cette énergie dissipée en quelques instants.

De nombreux phénomènes naturels de courte durée sont associés à la libération de grandes quantités d'énergie. Par exemple, la foudre peut développer une puissance électromagnétique de mille milliards de watts (1 TW), et les satellites artificiels enregistrent chaque année sur toute la Terre une moyenne de 1,4 milliard de coups de foudre, environ 45 par seconde. Certains aimeraient essayer d'exploiter à des fins énergétiques ces phénomènes naturels, ou d'autres plus puissants comme les éruptions volcaniques, les séismes, les cyclones tropicaux ou des tempêtes plus petites, des chutes de grêle.

En pratique, toutefois, les seules ressources d'énergie renouvelables « non

conventionnelles » réellement utilisables sont celles associées à l'énergie cinétique de l'eau des mers, un phénomène souvent discret mais continu. Le mouvement de l'eau peut être associé à l'action des forces gravitationnelles (marées), à la génération de perturbations dues à des vents de surface (vagues) et à des différences de température ou de densité entre les couches de surface et les profondeurs des océans (courants marins).

La puissance totale des courants marins est estimée à 100 GW, étant donné l'immensité de la surface de la mer sur notre planète cela ne représente qu'une puissance de 0,3 mW/m^2. Cette forme d'énergie ne devient intéressante que dans les endroits étroits car la vitesse de l'eau y augmente avec la diminution de la section du cours de l'eau, ce que savait déjà les marins de l'antiquité qui traversaient le détroit de Messine, entre Charybde et Scylla.

D'un point de vue quantitatif, cependant, il est beaucoup plus prometteur d'exploiter les marées, qui déplacent d'énormes masses d'eau durant des durées relativement courtes. On estime que l'énergie potentielle gravitationnelle exploitable des marées est au moins de 360 GW. Naturellement, l'exploitation de ces phénomènes devraient être concentrée dans les zones où les effets de marée sont bien supérieurs à ceux observés en Méditerranée, par exemple, certaines zones côtières du Canada, de l'Alaska, du sud de l'Argentine et de la Normandie. Dans ces régions, les variations de hauteur des marées vont de 5 à 15 mètres et les masses d'eau en mouvement sont énormes. L'exploitation de ces phénomènes est comparable à celle des grands fleuves avec de petites chutes d'eau.

Il n'existe dans le Monde qu'une seule usine marémotrice de grande puissance (240 MW) qui utilise le mouvement des marées, à Saint-Malo dans le nord de la Bretagne. La production d'électricité s'effectue en utilisant les deux sens de circulation du flux suivant que la marée est montante ou descendante. Un sérieux problème pour les systèmes de cette taille est leur implantation qui barre une portion de littoral et rend la navigation très difficile. Pour cette raison, il est préférable d'expérimenter avec des unités plus petites et en eau profonde qui exploitent les courants sous-marins générés par les marées. Elles sont essentiellement similaires à celles des éoliennes, mais de taille considérablement plus petite. L'un des principaux défis pour ces technologies est la résistance des matériaux à l'effet corrosif de l'eau salée. Par ailleurs, un aspect très intéressant de l'exploitation des marées est l'extrême précision, pratiquement imbattable dans le domaine des énergies renouvelables, avec laquelle on peut prédire le rythme et la quantité d'énergie fournie par un dispositif.

Les vagues sont des systèmes de concentration de l'énergie éolienne, grâce à la densité plus élevée de l'eau par rapport à l'air. La puissance estimée des vagues est énorme, environ 90 TW (à comparer à la demande de puissance dans le monde qui s'élève aujourd'hui à près de 13 TW). Le premier brevet pour une machine permettant d'exploiter l'énergie des vagues a été déposé en France en 1799 et l'intérêt pour cette technologie, assoupi la plupart du temps, refait surface régulièrement lors des crises énergétiques comme dans les années soixante-dix ou aujourd'hui.

En raison de la répartition des vents dans le monde, les zones potentiellement les plus intéressants du point de vue de l'énergie des vagues sont les côtes occidentales des continents de l'hémisphère nord aux latitudes médianes, par exemple, le Portugal, l'Ecosse et la Californie. Au large de ces régions, il existe aujourd'hui des dizaines de projets pilotes qui utilisent différents types de machines. Mais on s'attend à ce que peu d'entre elles n'arrivent sur le marché. Le défi technique le plus important est la résistance des machines, qui doivent être conçues pour résister aux conditions climatiques beaucoup plus défavorables que les conditions ordinaires. Un seul événement météorologique particulièrement intense peut en effet détruire l'installation entière. Parmi les opposants à ces technologies on trouve les pêcheurs et les surfeurs, mais on peut imaginer qu'il ne sera probablement pas difficile de trouver de la place pour tous sur la mer. Si elles trouvent un nombre suffisant d'investisseurs ces technologies pourront former un créneau de développement intéressant. Un récent rapport estime que le Royaume-Uni pourrait obtenir des vagues plus de 20 000 MW d'électricité d'ici le milieu du siècle.

Une autre forme d'énergie océanique étudiée déjà depuis un certain temps repose sur la différence de température de l'eau, entre le fond de la mer et sa surface. De grands investissements ont été réalisés dans ce sens dans les années soixante-dix, mais avec un succès modeste. La technologie appelée ETM (énergie thermique des mers) a besoin d'un gradient thermique d'au moins 20°C entre la surface et une profondeur ne dépassant pas 1000 m. Cela rend attrayantes les zones océaniques à cheval sur l'équateur, en particulier dans l'ouest du Pacifique, mais jusqu'à présent il n'existe que des unités de démonstration.

L'utilisation de réservoirs d'eau thermale profonde à proximité des grandes villes est plus prometteuse. Par exemple, une climatisation centrale dessert certains des grattes-ciel des quartiers financiers de Toronto, au Canada, en utilisant comme réserve d'eau froide, les eaux du fond du lac Ontario. L'économie de puissance électrique dans ce cas est supérieure à 7 MW.

Les technologies renouvelables « hydriques » que nous avons mentionnées sont encore, dans de nombreux cas, en cours d'essai initial. Il convient toutefois de noter que le vent était dans une situation similaire il y a vingt ans et que sa croissance s'est maintenant accélérée.

Dans un monde en quête de ressources énergétiques propres et devant le besoin urgent de se libérer des combustibles fossiles il est raisonnable de s'attendre à ce que ces technologies de l'énergie, aujourd'hui mineures, feront partie du bouquet d'énergies renouvelables que nous mettrons en place au cours de ce siècle. Cette réalisation éventuelle dépendra fortement de la disponibilité des crédits alloués à la recherche scientifique et aux développements technologiques, qui sont jusqu'ici très bas comparés à ceux dont jouissent les autres technologies énergétiques.

CHAPITRE 9

Scénarios pour un futur possible

Un politicien pense aux prochaines élections, un homme d'État pense à la prochaine génération.
Alcide de Gasperi

Lorsque vous produisez des marchandises ou des services c'est comme si vous creusiez un trou dans la croûte terrestre pour prendre les ressources nécessaires, générant alors toutes sortes de déchets (figure 22).

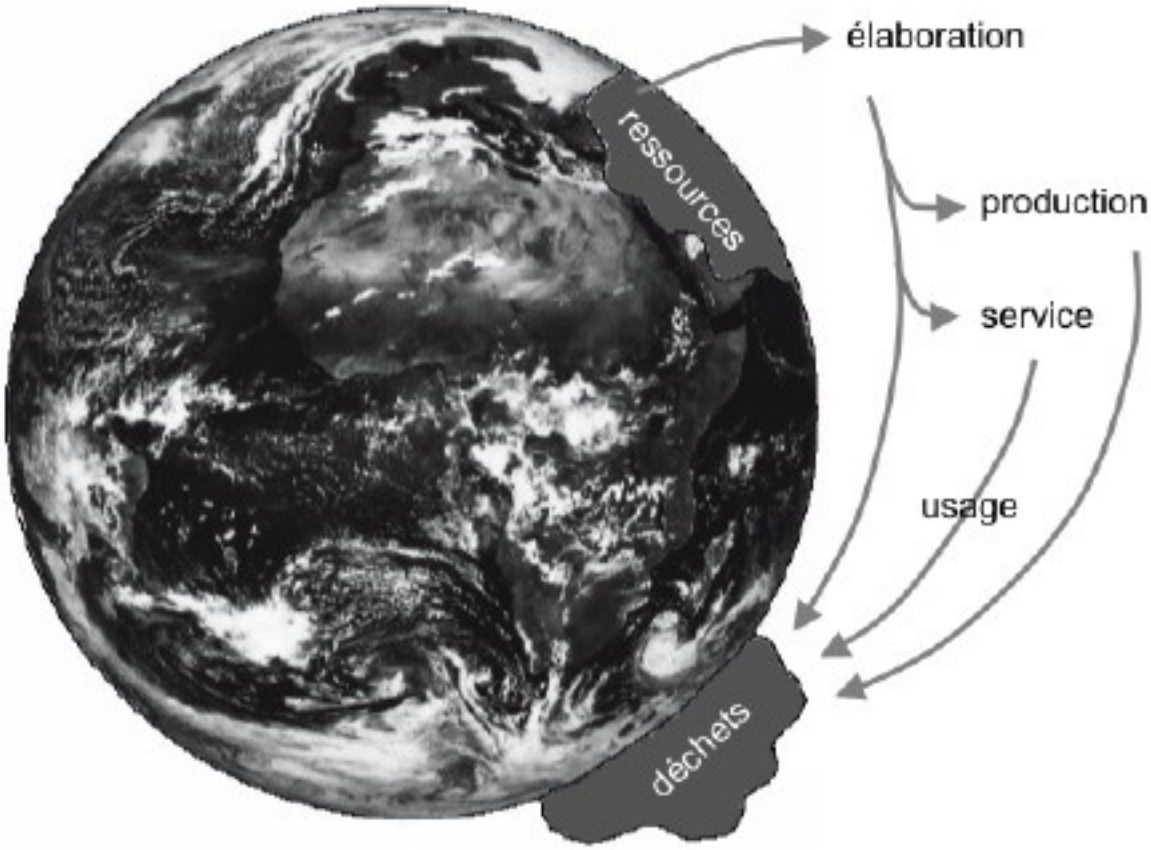


Figure 22. L'utilisation des ressources non-renouvelables comme les combustibles fossiles, produisent inévitablement des déchets.

Chaque action de l'homme dans la « technosphère » laisse derrière elle une nature appauvrie et polluée. L'augmentation de l'activité humaine fait craindre que les ressources nécessaires à la vie et au bien-être de l'homme ne soient compromises de manière irréversible, comme l'air que nous respirons, ou ne viennent à disparaître, comme dans le cas des combustibles fossiles.

Chaque baril de pétrole brûlé aujourd'hui signifie, pour les générations futures, un baril de pétrole disponible en moins et 300 kg de dioxyde de carbone en plus dans l'atmosphère. Le problème de la consommation des ressources et de l'accumulation de déchets ne s'applique pas seulement aux personnes présentes

sur Terre aujourd'hui, mais encore davantage à nos petits-enfants.

Le développement (non) durable

Au cours des dernières décennies, l'idée à fait son chemin qu'il faut être conscient des limites physiques du développement, ou mieux qu'il faut essayer de poursuivre un développement durable. Ce développement durable est défini, en première approximation, comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins.
Pour le moment, cependant, le développement n'est entendu que comme la production croissante de biens et de services, qui ne laisse pas aux générations future une quantité équivalente et de même qualité de ressources. Ce développement n'est donc pas viable et continuer dans cette voie c'est poursuivre un développement non-durable.

Pour atteindre cet objectif réduit, les activités humaines doivent être évaluées en fonction de leur coût énergétique, de leur coût en matières premières et aussi de leur impact environnemental. À utilité économique égale, la préférence devrait aller aux biens et services qui nécessitent moins de matières premières et d'énergie, qui durent plus longtemps, qui produisent moins de déchets, ceux qui conduisent à moins de pollution et moins de consommation des ressources naturelles.

L'américain piéton ?

Afin de quantifier et de discuter les problèmes de durabilité on utilise divers types de paramètres. Le plus connu d'entre eux est l'empreinte écologique, définie comme la surface terrestre capable de fournir les ressources nécessaires à la consommation quotidienne d'une personne et à l'élimination de ses déchets.

Selon une estimation généralement acceptée la Terre est aujourd'hui capable de supporter une empreinte écologique moyenne de 1,8 hectares par habitant (1 hectare = 10 000 m^2). Les estimations les plus récentes montrent que le citoyen Américain moyen a une empreinte écologique de 9,6 hectares. L'empreinte écologique est de 7,6 hectares pour un Canadien, de 4,5 pour un Allemand, un Italien a une empreinte de 4,2, 1,3 pour un Colombien, 0,8 pour un Indien, 0,7 pour un érythréen et 0,1 pour un Afghan.

Les gens ne pèsent donc pas de la même manière sur la Terre. Il y a des populations qui exploitent des parts de la Terre qui dépassent beaucoup leur dû, tandis que d'autres utilisent des parts minuscules.

On estime que chaque citoyen Américain né aujourd'hui vivra en moyenne 82 ans et utilisera dans sa vie environ 4 millions de kWh d'électricité, 200 millions de litres d'eau et 300 000 litres de carburant, produisant 1600 tonnes de CO_2.

Si chacun des 6,7 milliards d'habitants de la Terre avait une empreinte écologique égale à celle de la moyenne américaine, il faudrait disposer d'environ quatre

Terres. Ces données suggèrent que la planète ne pourra jamais vivre à l'américaine et on se rapproche du jour où cela ne sera plus possible même en Amérique du Nord.

Il vient naturellement à l'esprit que les pays riches doivent donner l'exemple, pour réduire la non-durabilité du développement actuel. En réalité, même en appelant les riches à consommer moins, en particulier dans le secteur de l'énergie, en contradiction avec l'idée soutenue par de nombreux économistes, et approuvée par la plupart des politiciens, le produit intérieur brut (PIB) de nos pays riches a augmenté d'au moins 2 à 3% par an. On a suivi les invitations répétées à manger davantage, et les incitations à consommer toujours plus.

Le PIB des pays développés continuera probablement encore à augmenter pendant quelques années ou décennies, causant au passage des dommages graves que devront résoudre ceux qui prendront en charge les nouvelles générations.

Le bonheur par la consommation ?

Produire plus, consommer plus, faire croître le PIB. Est-ce vraiment la recette du bonheur ? Sommes nous sûrs qu'un agriculteur moderne, poussé à produire plus et plus vite, en compromettant la fertilité de son terrain, est plus heureux qu'un vieux fermier qui a planté un petit chêne pour que ses petits-enfants puissent s'y mettre à l'ombre ?

Pourtant, nous pouvons constater que la croissance économique et la prospérité ont divergé. Aussi, pour mesurer le bien-être on commence à utiliser des indicateurs qui tiennent compte de la durabilité sociale et de l'environnement en plus de la production économique. Per exemple le GPI (Genuine Progress Indicator, en français indicateur de progrès véritable, IPV) est un indicateur qui vise à mesurer l'amélioration de la qualité de vie d'une nation. Pour cela, il est calculé en faisant la distinction entre les éléments positifs qui augmentent le bien-être, tels que des biens et des services et les éléments négatifs, tels que les coûts de la criminalité, la pollution, les accidents de la route qui diminuent le bien-être.

L'IPV est proposé comme une alternative au PIB, qui considère que tous les coûts sont positifs et ne tient pas compte de toutes les activités qui ne sont pas comptabilisées dans les flux monétaires, mais qui contribuent pourtant à augmenter le bien-être d'une société, comme le travail des femmes au foyer ou le bénévolat. Nous voyons donc que, dans les pays développés, tandis que le PIB continue d'augmenter, le bien-être diminue. (figure 23).

Un discours semblable s'applique en particulier à la consommation d'énergie. Nous avons tendance à penser que la qualité de vie augmente toujours avec la consommation croissante d'énergie, mais cela n'est vrai que pour les pays les plus pauvres, où la consommation d'énergie par habitant est très faible. En effet, lorsque ce paramètre atteint la valeur de près de 2600 kWh par an (110 GJ, soit moins de la moitié de la consommation moyenne actuelle dans le monde occidental) une nouvelle augmentation de la consommation ne conduit pas à une amélioration

sensible de la qualité de vie.

Par exemple, la mortalité infantile est légèrement plus faible en Italie qu'aux États-Unis, même si la consommation d'énergie par personne y est plus du double de celle de l'Italie. Plusieurs autres indices confirment que, dans les pays développés, la qualité de vie n'augmente pas avec la consommation d'énergie. Une analyse rigoureuse montre que ces pays pourraient réduire leur consommation d'énergie de 30%, sans sacrifier à leur confort car l'obésité énergétique est très douloureuse, comme nous en avons discuté au chapitre 3.

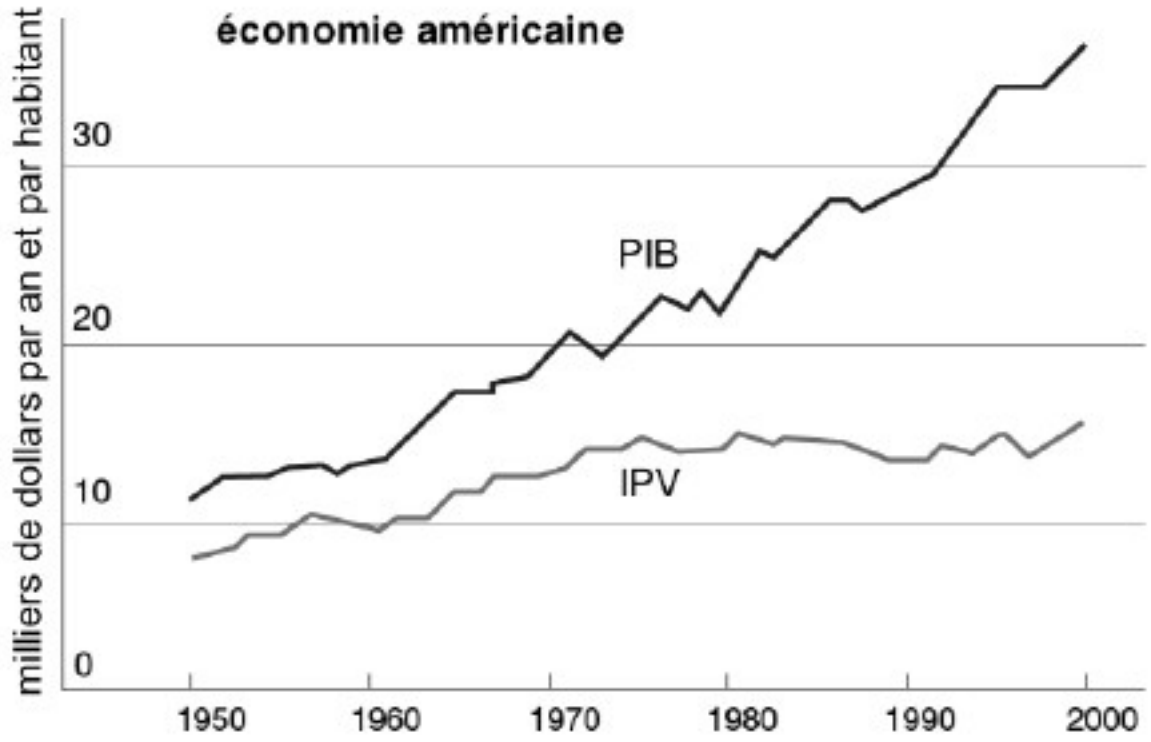


Figure 23. L'indicateur IPV, proposé en 1994, est le résultat de l'étude d'un groupe de chercheurs et d'économistes tels que Herman Daly, John Cobb et Philip Lawn. Toutes les études ont montré que si le PIB s'est accru au cours des dernières décennies, l'IPV n'a augmenté qu'au début des années soixante-dix puis qu'il a alors cessé de croître.
Source des données : Redefining Progress, www.rprogress.org.

En divisant l'offre actuelle mondiale d'énergie primaire (près de 11 Gtep, 400 EJ) par le nombre d'habitants de la planète (6,7 milliards), on obtient une valeur d'environ 60 GJ par habitant, à peu près égale à la quantité d'énergie consommée par un citoyen moyen en Europe occidentale dans les années soixante, ou un citoyen des pays des Balkans d'aujourd'hui.

En d'autres termes, il se consomme aujourd'hui une quantité totale d'énergie qui permettrait à tous les habitants de la planète de jouir d'un niveau de vie mieux que décent. Malheureusement, la réalité est bien différente. Les Européens consomment aujourd'hui trois fois plus que ce que nous consommions dans les années soixante (180 GJ / an), tandis que le Canada et les États-Unis devraient

réduire leur consommation (300 GJ/an) de 80% pour atteindre le seuil de l'équité de 60 GJ par personne.

Certes, on ne peut pas imposer par la force un retour à la consommation des pays riches d'il y a quarante ans. Mais les chiffres cités ci-dessus devraient au moins susciter quelques réflexions. Par exemple, la vie dans les pays riches des années soixante était-elle vraiment si indigente qu'elle exigeait un triplement de la consommation d'énergie ?

Trop c'est trop

Plus, plus grand, plus rapide semblent être des lois auxquelles, d'une manière pas tout à fait consciente, nous nous conformons dans notre consommation quotidienne. Nous utilisons plus d'énergie, on produit plus de voitures, on coupe toujours plus d'arbres, on pêche toujours plus de poisson et ainsi de suite. Souvent sans penser que les combustibles fossiles ne se régénèrent pas, que les forêts et les poissons obéissent à des cycles naturels et non pas économiques, que l'atmosphère dans laquelle nous diluons nos rejets n'est pas un réservoir infini.

Aujourd'hui, lorsqu'on parle d'économie, de consommation et de déchets, il semble que des mots comme trop et assez sont censurés, voire éliminés. Nous perdons le sens de la mesure.

De nombreux signes, à commencer par la crise climatique, nous montrent pourtant qu'il est nécessaire de changer de direction et de passer d'une logique de la consommation et de l'efficacité à tout prix à une logique de la modération et de la suffisance.

L'humanité tout entière doit arriver à comprendre jusqu'où on peut aller et chacun d'entre nous doit apprendre à se limiter et à pouvoir dire « ça suffit pour moi ». En disant : j'en ai assez, on respecte une valeur écologique et on affirme de plus une valeur sociale. Ce n'est pas de l'idéalisme, mais une nécessité.

En fait, la notion de limite fait déjà partie de la conscience individuelle. Même si je me damnerais pour du chocolat, je sais que si j'en mange 3 kilos je serai malade et donc je me retiens. Curieusement, toutefois, ce sens de la limitation ne semble pas faire partie de la conscience collective et augmenter la consommation de tous les produits est toujours considéré comme une bonne chose. Les politiciens, les économistes et les syndicalistes le répètent jusqu'à l'obsession et en prenant un air inspiré : la société dans son ensemble doit augmenter sa consommation.

C'est à se demander si les gens vivent dans le monde dont ils parlent. Beaucoup de nos maisons sont pleines de tout le superflu possible. Trouver des cadeaux à offrir est souvent un cauchemar car tout le monde a tout. Cette foi aveugle dans le développement infini qui témoigne d'un mépris réel pour les lois fondamentales de l'univers, trouve son apothéose dans le crédit à la consommation qui met tout à la portée de tous pour 9,99 euros par mois. Ce mirage de la consommation à tout prix devient parfois l'antichambre de la ruine financière et personnelle. Mais qu'elle importance cela a-t-il ? L'important est de faire croître le PIB !

Stratégie

L'histoire de la civilisation humaine peut être considérée comme le développement progressif de ressources énergétiques et de technologies nouvelles dévolues à leur utilisation. S'il est vrai qu'au fil des ans, les connaissances et l'information prennent plus d'importance que la disponibilité des matières premières, aujourd'hui c'est encore l'énergie, qui détermine, guide, forge et restreint la capacité de travailler dans tous les processus de la société.

Dans la phase historique actuelle, nous devons prendre conscience que les combustibles fossiles ne sont disponibles qu'en quantité limitée et qu'il sont un cadeau unique que la nature nous a fait. Aujourd'hui, nous savons également que l'usage prolongé de ce don de la nature est la cause de dommages importants à l'humanité et à l'environnement. À partir de ces faits irréfutables trois stratégies sont inscrites dans notre horizon énergétique, toutes très différentes.

La première consiste à continuer à utiliser de plus en plus de combustibles fossiles en essayant de trouver d'autres sources aux quatre coins de la Terre. Il s'agit là de la stratégie de l'autruche, qui se cache la tête pour pas voir le danger. Tôt ou tard, on arrivera à un point où les combustibles fossiles seront épuisés. Avant cela surviendra une crise écologique irréversible.

La deuxième stratégie est de ne pas s'appuyer sur les énergies renouvelables, car, dit-on, elles seraient incapables de garantir l'énorme quantité d'énergie nécessaire dans le modèle de développement actuel. Afin de s'assurer que la croissance se poursuivra quand même, cette stratégie met l'accent sur l'expansion des géants de l'énergie nucléaire. Ce choix est fait alors même qu'on sait, chiffres en main, que la probabilité de réussite à long terme est très faible et qu'elle est nulle à court terme.

À ce stade, il est clair que le problème de l'énergie met en cause directement le modèle même de développement. La troisième approche part du fait que nous devons prendre acte des limites physiques de la biosphère et réduire la consommation d'énergie et de matières premières. Dans cette perspective, il faut s'appuyer essentiellement sur le développement des énergies renouvelables afin qu'elles deviennent prépondérantes à le long terme.

La jonction

La question énergétique place l'humanité à un carrefour. D'un côté il y a la défense à outrance d'un mode de vie à très forte consommation énergétique des pays riches. Un mode de vie qui ne se préoccupe pas des dommages faits à l'environnement, qui n'exclut pas les actes de violence ou même la guerre pour conquérir le reste des réserves fossiles, qui n'a cure de réduire les inégalités, qui est exposé aux risques de prolifération nucléaire et qui enfin ne prend pas en compte les droits des générations futures.

D'autre part il y a la promesse d'un changement radical de style de vie imposé par la nécessité de contraintes physiques, mais qui se veut également un choix

éthique : un style de vie fondé sur une consommation sobre et suffisante. Cette seconde option prévoit une période de transition dans lequel il va falloir progressivement réduire l'utilisation de combustibles fossiles, en empêchant le développement de l'énergie nucléaire et en développant tous les types d'énergies propres et renouvelables possibles, chacune valorisant les particularités spécifiques du territoire d'implantation.

Si aujourd'hui, nous ne pouvons pas connaître en détail ce que sera le système énergétique de l'avenir, nous pouvons néanmoins prédire que chaque communauté devra assumer sa part de responsabilité sur la manière de répondre à ses besoins en énergie, en s'appuyant sur les ressources renouvelables disponibles.

C'est une approche diamétralement opposée à l'attitude actuelle, où les approvisionnements en énergie viennent de loin, souvent en provenance d'autres continents, dans un système qui élimine complètement la responsabilité du consommateur final, lui donnant l'illusion que tout peut continuer indéfiniment, encourageant ainsi le gaspillage.

La transition

Pour des raisons à la fois techniques et économiques, la transition vers les énergies renouvelables sera très longue car le coût des combustibles fossiles est encore relativement faible, parce qu'aussi les infrastructures d'énergie traditionnelles (puits, pipelines, gazoducs, raffineries) coutent cher, sont très répandues et bien établies.

La transition sera lente, aussi pour des raisons politiques et sociales. Il faudra du temps avant que les gouvernements ne prennent pleinement conscience des coûts sanitaires et des coûts économiques indirects causés par l'utilisation de combustibles fossiles. Il faudra du temps avant qu'ils n'interviennent par des politiques appropriées s'appuyant sur des mesures incitatives et dissuasives. Dans l'intervalle, nous devrons considérablement réduire la production de déchets, augmenter l'efficacité de la consommation d'énergie et lancer de vastes programmes de recherche et de développement sur les énergies renouvelables.

La suppression progressive de l'énergie dense des combustibles fossiles, le passage progressif à des énergies renouvelables diluées (tableau 8) se traduira par une modification substantielle des modes de vie. Il faudra s'habituer à consommer moins d'énergie, en particulier dans le secteur des transports. Mais en contre-partie nous serons plus libres, parce que l'énergie ne sera plus localisée dans des zones limitées de la planète mais sera plus uniformément distribuée et ne sera plus détenue par une poignée de nations.

La responsabilité

Il est temps pour les scientifiques de parler franchement, ouvertement aux citoyens et aux politiciens dans notre pays : l'augmentation exponentielle de la consommation d'énergie est une spirale qui doit être stoppée, elle n'est pas viable

en termes de thermodynamique et d'écologie et elle est aussi inacceptable du point de vue moral. On ne peut pas répondre à l'augmentation continue de la demande d'énergie par une augmentation constante de l'offre, il faut agir de manière décisive à réduire la demande. Cela est possible ici et maintenant.

Table 8 : La puissance par unité de surface obtenue par différentes sources d'énergie.

Energie	**densité de puissance en W/m^2**
photovoltaïque	20-60
éolienne	5-20
hydroélectrique d'altitude	10-50
hydroélectrique au fil de l'eau	~1
marine	10-50
biomasse	< 1
combustibles fossiles	1000-10 000

La densité de puissance décrit la quantité d'énergie utile, que l'on peut récupérer à partir d'une source d'énergie donnée pour chaque mètre carré de superficie occupée à sa production. Les réservoirs hydro-électriques dans la partie haute des bassins fluviaux sont les plus avantageux, car ils produisent le plus d'énergie pour une surface donnée. Le tableau montre clairement que l'énergie provenant des combustibles fossiles est extrêmement concentrée, par rapport à la dilution des autres formes d'énergie. Ceci est l'élément qui détermine la différence radicale entre le système énergétique actuel et les scénarios futurs possibles à partir de sources renouvelables.

La classe politique doit comprendre que l'énergie est le grand problème du XXIe siècle. Il est nécessaire d'assurer un approvisionnement d'énergie à 6,7 milliard de personnes qui deviendront plus de 8 milliards en vingt ans pour permettre leur coexistence pacifique sans affecter de manière irréversible l'équilibre de la biosphère.

Des choix politiques sages sur l'énergie ne sont certainement pas encouragés par la publication d'articles et de livres qui propagent un optimisme facile sur la santé de la planète et sur l'évolution des ressources de la Terre. Il est totalement dénué de fondement scientifique d'affirmer, comme certains le font, qu'il y a une grande abondance de combustibles fossiles, que la pollution de l'air n'est pas un problème, que le réchauffement global est un canular et que la population mondiale peut augmenter sans mesure. Et il est absolument scandaleux de soutenir, comme le font pourtant certains, qu'économiser l'énergie est inutile voire nuisible.

L'éducation est nécessaire pour susciter une utilisation rationnelle de l'énergie, elle doit se faire dans les écoles de tous niveaux. Chacun doit prendre conscience qu'une lampe allumée, un appareil électrique en marche, une voiture en mouvement ont un coût non seulement économique mais aussi environnemental et social.

Avant tout il faut comprendre que nous sommes au seuil d'une ère nouvelle et que nous devons y faire face. Il faut développer l'utilisation des énergies solaires et autres énergies renouvelables, et pas l'énergie nucléaire qui est une régression parce qu'elle laisse aux générations futures un fardeau énorme de déchets radioactifs. Il faut aussi porter un regard global sur le monde car, contrairement aux combustibles fossiles et à l'uranium, l'énergie solaire et les autres énergies renouvelables sont présentes partout sur la Terre.

Défi et opportunité

À ce stade, on pourrait penser que nous avons une vision très pessimiste. C'est peut-être vrai, mais comme le dit le vieil adage : « La seule différence entre un optimiste et un pessimiste est que ce dernier est mieux informé ».

Il faut être conscient que c'est le pessimiste par connaissance et non l'optimiste par ignorance et désinformation, qui peut nous faire progresser. C'est seulement en comprenant les problèmes qu'on peut y remédier.

Pour cela il est nécessaire que tout le monde, en commençant par ceux qui nous gouvernent, comprenne trois faits de base : deux sont des vérités qui nous dérangent, nous, habitants des pays riches et le troisième est aussi une vérité, jusqu'ici ignorée, sur laquelle fonder nos espoirs.

Les deux vérités inconfortables ont déjà été mentionnées plusieurs fois dans ce livre: 1) les ressources de la Terre sont limitées et leur consommation ne peut pas se développer à l'infini, 2) les ressources doivent être réparties plus équitablement entre tous les résidents de la Terre. Ces deux vérités devraient nous inciter à éviter le gaspillage, à réduire la consommation, à utiliser les ressources (en premier lieu l'énergie) de manière plus efficace et à vivre plus équitablement.

La troisième vérité est que la Terre, accompagne le Soleil dans ses pérégrinations à travers l'univers et que le Soleil nous fournit une grande quantité d'énergie. L'énergie qui provient du soleil est inépuisable, parce que notre étoile brillera encore pendant des milliards d'années. Elle est abondante, car nous recevons chaque heure ce que l'humanité consomme en un an. Cette énergie ne pollue pas, elle maintient la vie sur Terre, elle est diluée et ne peut donc pas servir à des fins guerrières. Surtout elle est répartie assez uniformément donc équitablement sur toute la Terre.

Telle est la grande valeur de l'énergie solaire. L'utilisation des énergies solaire et des autres énergies renouvelables, qui sont également distribuées sur toute la Terre, est donc un défi mais également une grande chance : si nous apprenons à les utiliser efficacement, elles peuvent résoudre non seulement le problème de l'énergie et les problèmes environnementaux, mais peut-être aussi celui des inégalités.

Nous ne pensons pas qu'il vous restera beaucoup de choses à l'esprit après avoir lu ce livre. Mais nous serions heureux qu'au moins une idée reste : on ne peut pas

progresser en matière d'énergie sans vaincre l'ignorance, supprimer les déchets et reconnaître les limites de la biosphère.

Le trajet long et pénible de la transition énergétique qui est devant nous n'est pas seulement un test de fascinant de l'évolution scientifique et technologique, il est surtout d'un défi culturel et moral pour plus de sobriété et plus de responsabilité individuelle qui nous concerne tous. Vous aussi.

Le temps nous est compté, il faut faire vite.