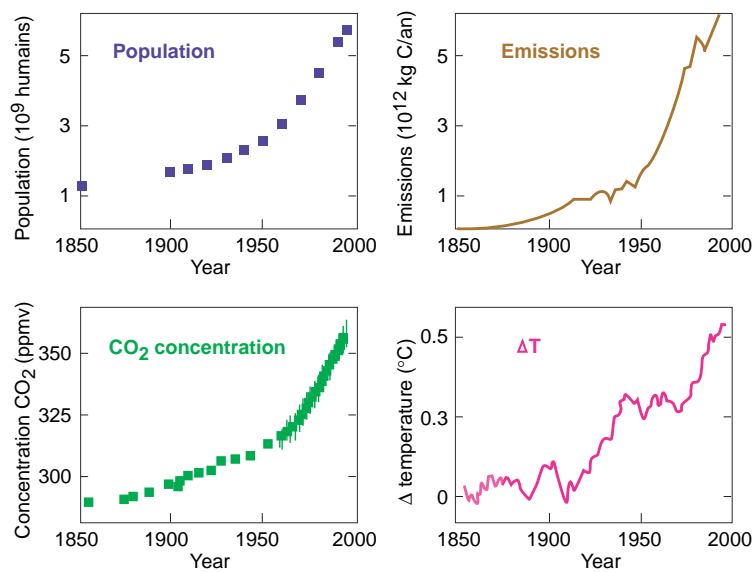


Regard d'un physicien sur le problème de l'énergie



Jean-Pierre Revol

20 novembre 2002

Inauguration de l'Institut Energie et Systèmes Electriques
Aula de l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud
Yverdon-les-Bains

1- Regard d'un physicien

Pourquoi le ciel est-il bleu, pourquoi les nuages sont-ils blancs, quelle est la structure de la matière, celle de l'Univers tout entier, quel est son passé, son futur ? Pourquoi le ballon de l'enfant gonflé à l'hélium et retenu par une ficelle à l'intérieur d'une automobile se déplace-t-il vers l'avant et non pas vers l'arrière lorsque le véhicule démarre au feu vert ?

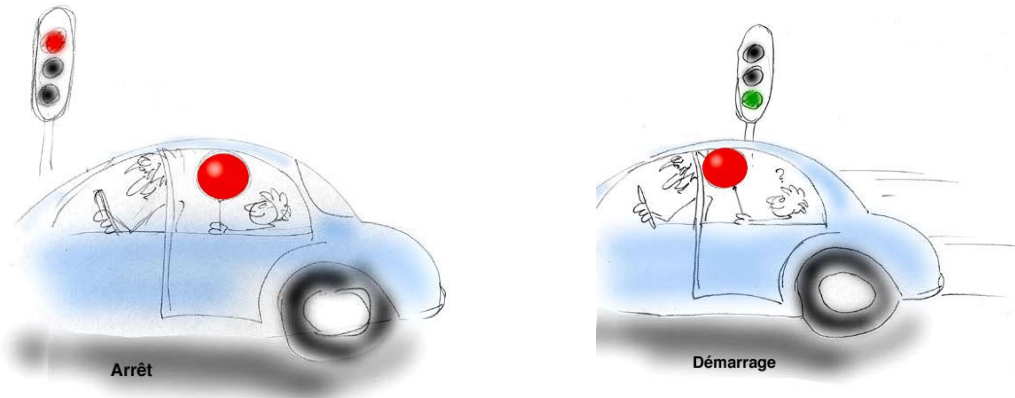


Figure 1 : Un physicien peut expliquer dans quelle direction va le ballon gonflé à l'hélium lorsque la voiture accélère vers l'avant (Dessin de Vittorio Frigo).

Telles sont les questions que l'homme se pose depuis qu'il a pris conscience de son existence, et auxquelles les physiciens se sont attachés à répondre. Grâce aux réponses apportées, la société dispose aujourd'hui de la radiographie médicale, de l'imagerie médicale, du moteur électrique, du laser, de la radio, de la télévision, du téléphone, de l'ordinateur, du Web, etc., de pratiquement toutes les innovations importantes qui ont marqué l'époque moderne et qui presque toutes doivent leur origine à la recherche fondamentale. Archimède, Galilée, Newton, Faraday, Einstein, Marie Curie, Fermi sont parmi les physiciens les plus célèbres pour avoir chacun contribué à des révolutions successives dans notre connaissance des lois de la Nature. Aujourd'hui, les physiciens continuent à explorer la Nature au sens large, de la structure intime de la matière (physique des particules au CERN par exemple) à la structure de l'Univers tout entier (astronomie, astrophysique). Ils en recherchent les lois, si possible fondamentales, qui régissent l'ordre et le désordre observés à chacune des échelles de grandeur des phénomènes entre l'infiniment grand, de l'ordre de 5×10^{26} mètres pour l'Univers connu et l'infiniment petit, 10^{-19} mètres, pour l'échelle la plus petite explorée jusqu'ici, en particulier au CERN.

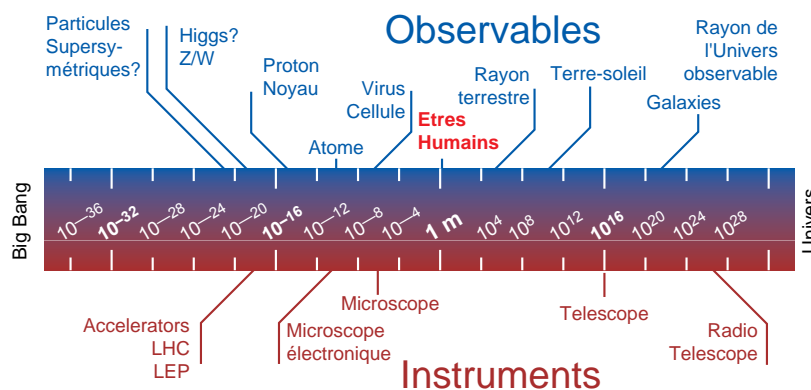


Figure 2 : Echelle de grandeurs ; l'homme entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.

Si les physiciens d'aujourd'hui sont pour la plupart beaucoup moins connus que certains de leurs illustres prédécesseurs, c'est que la recherche fondamentale a pris une direction beaucoup plus collective. Un physicien ne peut pas construire à lui tout seul le télescope Hubble ni le grand collisionneur de hadrons, le LHC du CERN.



Figure 3 : La galaxie d'Andromède photographiée par le télescope Hubble.

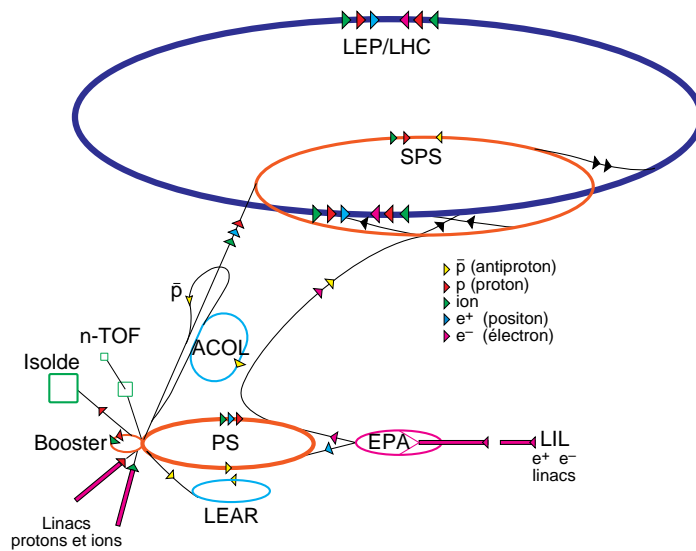


Figure 4 : Le complexe d'accélérateurs du CERN. Le tunnel du LHC a 27 km de circonférence.

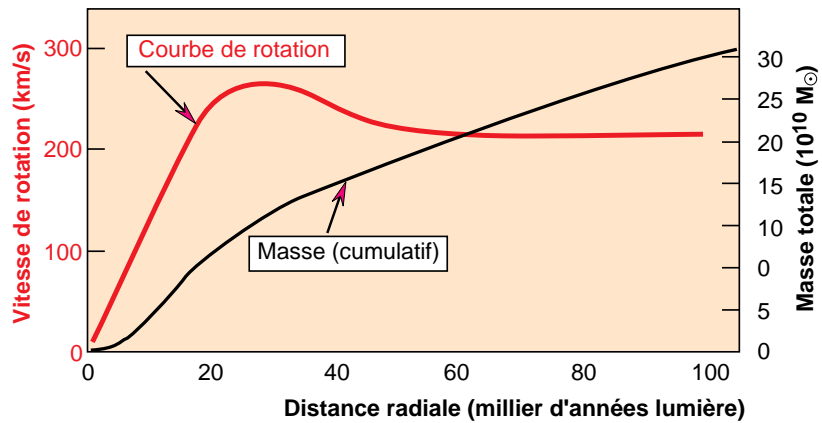


Figure 5 : Mesure de la vitesse de rotation en fonction de la distance au centre de la galaxie d'Andromède ainsi que la distribution de matière qui en résulte.

En fait, près de 10000 physiciens sont impliqués dans le LHC, le projet le plus ambitieux de toute l'histoire de la physique des particules, une aventure extraordinaire, peut-être même historique, qui se déroule au cœur de l'Europe, à la frontière franco-suisse, à une heure seulement de voiture d'Yverdon.

Le but du physicien est la connaissance, sa seule motivation est la curiosité humaine. Le LHC a pour ambition principale la recherche de l'origine de la masse des particules élémentaires et de la nature de la matière manquante dans l'Univers. Il pourrait aussi nous réserver quelques surprises scientifiques, mais il apportera sans doute en retour quelques innovations technologiques, ne serait-ce que par les outils nouveaux (accélérateurs, détecteurs et moyens de calcul) que sa mise en œuvre va demander. L'histoire montre clairement que c'est la recherche fondamentale, donc la curiosité humaine, qui pilote l'innovation, permettant ainsi d'introduire les technologies nouvelles qui font évoluer notre société (améliorer l'éclairage à la bougie n'est pas une innovation, mais inventer l'éclairage électrique est une innovation ; inventer le World Wide Web¹ est une innovation dans le domaine de la communication). Dans certains cas, c'est le manque d'innovation qui pose problème : ainsi les centrales nucléaires fonctionnent aujourd'hui essentiellement sur le même principe qu'il y a 50 ans. Elles furent à l'origine le résultat d'une application militaire et ne sont pas nécessairement le meilleur moyen aujourd'hui d'utiliser la fission nucléaire pour fournir de l'électricité.

2– Soutenir la recherche fondamentale

La recherche fondamentale continue plus que jamais à jouer son rôle de pilote de l'innovation. Des physiciens motivés par leur intérêt pour la structure intime de la matière ont poussé la technologie des accélérateurs de particules à un point tel qu'il est aujourd'hui possible d'utiliser un accélérateur de protons pour piloter un nouveau type de système nucléaire avec des propriétés extrêmement séduisantes : l'Amplificateur d'Energie (AE) (Ref.1) de Carlo Rubbia, aussi appelé « système hybride » ou ADS¹.

Il faut donc soutenir la recherche fondamentale. Cette tâche est particulièrement difficile pour nos politiciens dont les objectifs se limitent généralement au court terme (réélection) car :

- on ne peut prédire avec certitude le résultat d'une recherche fondamentale donnée ;
- la culture scientifique est très limitée dans notre société et cela ne s'améliore pas. Il y a de moins en moins d'étudiants en sciences (rien ne vaut un MBA!). Dans notre société de plus en plus dépendante de la science on assiste paradoxalement à une montée de la superstition : voir à ce propos le livre de Georges Charpak et Henri Broch : « Devenez sorciers, devenez savants », récemment publié chez Odile Jacob.

La recherche fondamentale doit être soutenue sans réserve, car les limitations éthiques ne s'appliquent pas à la curiosité humaine mais seulement aux applications qui pourraient résulter de la recherche fondamentale. On confond souvent science et utilisation de la science et l'on a tendance à blâmer la science pour les méfaits de l'utilisation de la « technologie » qu'elle a engendrée. Dans le cas de la physique, les barrières sont très claires. Robert Oppenheimer, l'un des pères de la bombe atomique américaine, expliqua clairement que :

« L'homme de science n'est pas responsable des lois de la nature, mais c'est sa responsabilité que de découvrir comment ces lois fonctionnent. Toutefois, il n'est pas de sa responsabilité de déterminer s'il convient ou non d'utiliser une bombe à hydrogène. »

En revanche, cela ne dispense pas le scientifique de se comporter en citoyen responsable.

3– Pourquoi des physiciens, et plus spécifiquement des physiciens du CERN, se préoccupent-ils du problème de l'énergie ?

La raison en est qu'il s'agit en fait d'un devoir moral des physiciens vis-à-vis de la société. Le fait que la recherche fondamentale ait pour seul objet la quête de la connaissance ne signifie pas que les scientifiques doivent s'isoler de la société qui soutient leur activité. Leur responsabilité (Ref. 2) consiste au contraire à :

- aider à promouvoir la culture scientifique (transmettre le plaisir de la science), contribuer à l'éducation scientifique, aider la société à se préparer au rôle toujours plus important que la science devra jouer pour sa survie. Qui mieux que le scientifique pourrait défendre la recherche fondamentale ?

¹ Le World Wide Web fut inventé au CERN en 1990

² Accelerator Driven System : système piloté par accélérateur

– aider, chaque fois que possible, à la solution des problèmes de la société ; établir des passerelles avec l'industrie pour permettre le développement technologique.

Le scientifique doit s'attendre à devoir assumer pleinement cette responsabilité, car lorsqu'un problème se présente, c'est vers lui qu'on se tourne pour chercher une solution [SIDA, ESB, énergie propre, etc.]. C'est dans ce contexte que Carlo Rubbia et son équipe se sont penchés au CERN sur le problème de l'énergie.

4–L'Énergie

Que des physiciens s'intéressent à l'énergie n'est que naturel, car ce sont eux qui en ont inventé le concept. Le mot « énergie » fut introduit par le physicien et médecin anglais Thomas Young (1773-1829). C'est l'un des concepts scientifiques les plus importants. Il est commun à tous les domaines de la science.

La conservation de l'énergie (**premier principe de la thermodynamique**) découle de l'invariance dans le temps (théorème de Noether). Einstein l'a étendu au domaine relativiste en y incluant la masse. Ce qui n'est pas conservé, en revanche, c'est l'énergie « libre », définie comme la capacité à effectuer un « travail ». Il faut donc se référer au **second principe de la thermodynamique** qui définit quels processus peuvent se produire, et quelle énergie libre on peut extraire d'une source d'énergie (dégradation de l'énergie, augmentation de l'entropie). Donc, parler de « production d'énergie » n'a aucun sens d'après la loi de conservation de l'énergie (violée seulement peut-être au niveau quantique, avec la complicité du principe d'incertitude d'Heisenberg : $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar/2\pi$). En pratique, on ne crée pas la moindre quantité d'énergie. On ne fait que transformer l'énergie d'une forme en une autre, tout en augmentant l'entropie de l'Univers. En pratique, on désire optimiser l'extraction d'énergie « utile », mais il y a une limite décrite par la thermodynamique (cycle de Carnot). Exemple d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP) :

$$\text{Rendement} \equiv 1 - \frac{T_F(K)}{T_C(K)} = 1 - \frac{(273 + 110)}{(273 + 290)} \sim 0,32.$$

T_F et T_C sont respectivement les températures des sources froide et chaude. Ceci implique que 2/3 de la chaleur est évacuée dans l'environnement ! Même si l'on pouvait aller jusqu'à la température critique[†] de l'eau (375°C), l'efficacité ne serait que de 40 % ! Ceci explique simplement pourquoi les REP n'ont aucun espoir de compétitivité économique à long terme, et pourquoi l'industrie nucléaire cherche à développer de nouveaux réacteurs à haute température (RCG[‡], $T \sim 600^\circ\text{C}$). Ceci explique aussi le succès des turbines à gaz, qui peuvent fonctionner à de très hautes températures.

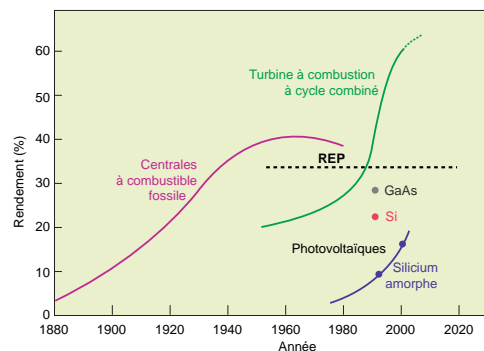


Figure 6 : Evolution des rendements de diverses méthodes de conversion de chaleur en électricité.

Une centrale électrique transforme l'énergie chimique (charbon, pétrole, gaz), gravitationnelle (barrage[°]) ou nucléaire, en énergie électrique. L'unité SI d'énergie est le **joule (J)**, une mesure de quantité d'énergie. L'unité de puissance est le **watt (W)**, une mesure du taux d'énergie en joules par seconde. L'unité de quantité d'énergie la plus utilisée en pratique est le **kilowattheure (kWh)**, qui correspond à une puissance de 1 kW (1000 W) délivrée pendant une heure (3600 s). Il en résulte que 1 kWh = 3 600 000 J.

[†] A la température critique, il n'est plus possible d'éviter l'apparition de vapeur

[‡] Réacteur à Caloporteur Gaz, refroidi à l'hélium

[°] Forme d'énergie solaire

5- Principaux éléments du problème de l'énergie

Le problème de l'énergie est probablement l'un des défis les plus sérieux auxquels notre civilisation est confrontée, car il conditionne la possibilité d'un développement durable et harmonieux. Du point de vue énergétique, notre civilisation se comporte aujourd'hui comme un immense moteur de 13 TW (13000 milliards de watts) de puissance (équivalant par exemple à une résistance chauffante pour l'eau du thé de 2 kW par habitant de la planète). C'est presque autant que la puissance géothermique (16 TW) et davantage que la puissance développée par les marées dues au soleil et à la lune (3,5 TW) : « *La civilisation humaine est sur le point de doubler la puissance énergétique endogène de la planète !* » (Ref. 3). La consommation d'énergie est en augmentation régulière d'environ 2,3 % par an depuis à peu près 150 ans.

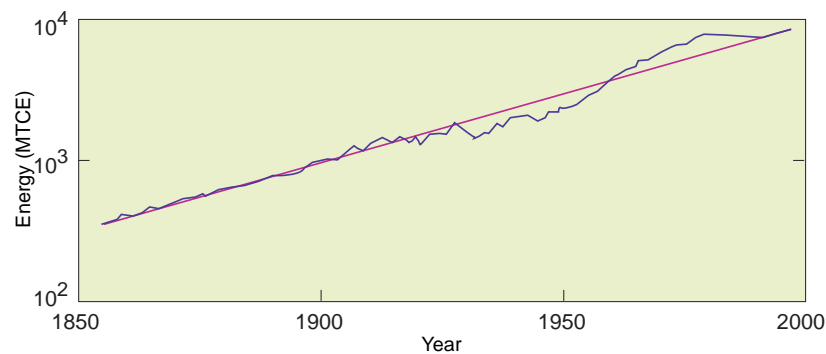


Figure 7 : Evolution de la consommation mondiale d'énergie en millions de tonnes d'équivalent charbon (MTEC¹).

Le problème de l'énergie est complexe, car il a des répercussions sur un grand nombre de domaines différents :

- Economique : la compétitivité de l'économie dépend directement de la disponibilité et du prix de l'énergie.
- Politique : les pays veulent garantir leur accès aux ressources énergétiques et si possible leur indépendance énergétique (ex. l'Europe et le Japon sont particulièrement dépourvus de ressources naturelles), ce qui a un effet direct à la fois sur la politique énergétique et économique et sur la politique étrangère, etc. (Guerre du Golfe, Menaces contre l'Irak, etc.).
- Ecologique : la production d'énergie a un impact toujours plus grand sur l'environnement. C'est là un autre sujet de préoccupation pour le physicien, dont la démarche typique est d'essayer de comprendre les éléments de base du problème avant de prétendre y apporter une solution.

La consommation d'énergie dans le monde va continuer à croître très fortement dans les années à venir, en raison de deux facteurs principaux :

- (¹) La consommation d'énergie par habitant croît avec le développement économique. Aujourd'hui un être humain consomme en moyenne 100 fois plus d'énergie que la fameuse Lucy. La corrélation entre développement et consommation individuelle d'énergie est visible aujourd'hui dans le monde et même à l'intérieur de l'Europe.
- (²) La population mondiale augmente de façon spectaculaire, presque exclusivement dans les PVD où justement la croissance économique est très importante. Par exemple, en cette période difficile pour l'économie mondiale, la Chine table, elle, sur une croissance annuelle de 8 % par an.

La combinaison des deux phénomènes fait que la croissance de la consommation d'énergie sera très spectaculaire dans les années qui viennent.

¹ 1 TEC = 29,3 GJ

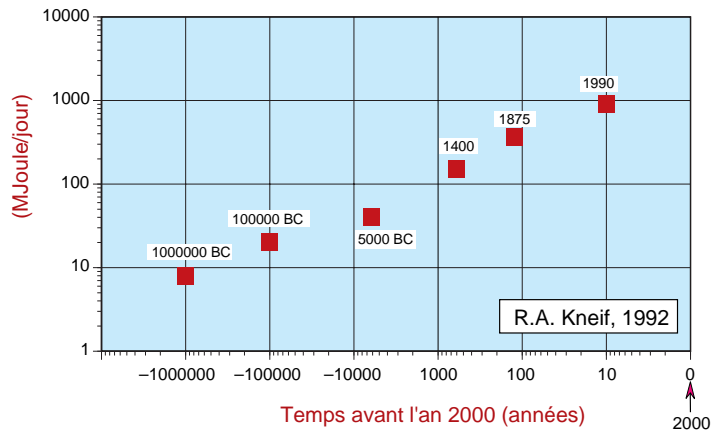


Figure 8 : Evolution dans le temps de la consommation d'énergie par habitant.

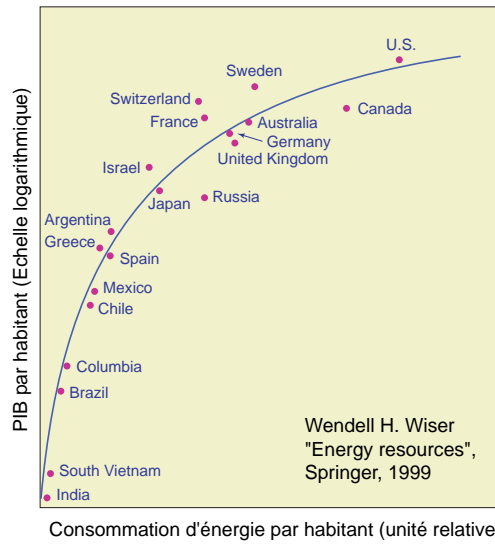


Figure 9 : Distribution dans le monde de la consommation d'énergie par habitant en fonction du PIB.

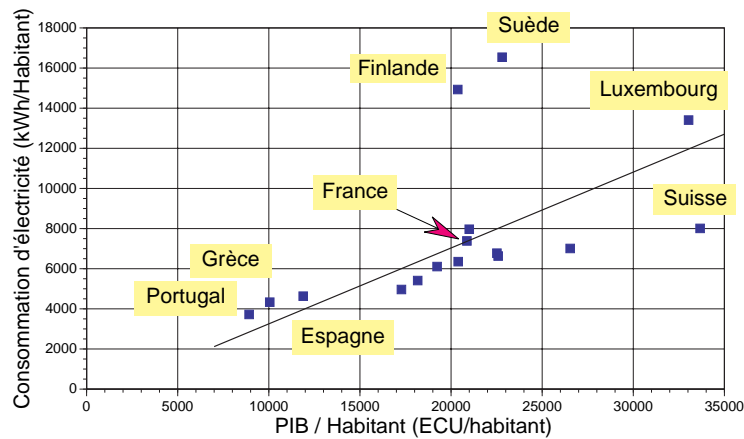


Figure 10 : Distribution en Europe de la consommation d'énergie électrique par habitant.

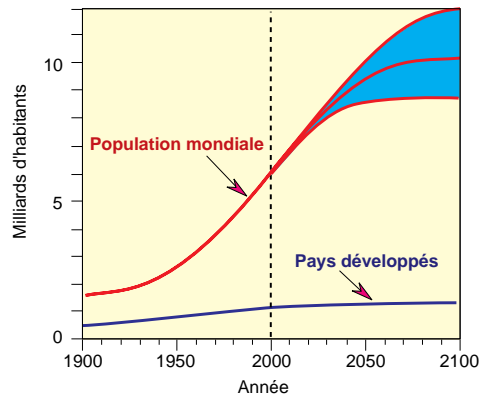


Figure 11 : Evolution de la population mondiale et de celle des pays développés, depuis l'année 1900 et prévisions pour le 21^e siècle.

L'inégalité dans le monde vis-à-vis de la consommation d'énergie est flagrante. Un citoyen américain consomme environ dix fois plus d'énergie qu'un citoyen indien ou chinois.

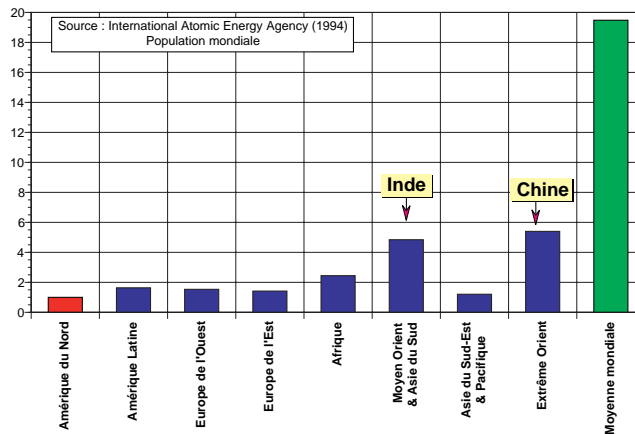


Figure 12 : Distribution géographique de la population mondiale normalisée à celle de l'Amérique du Nord.

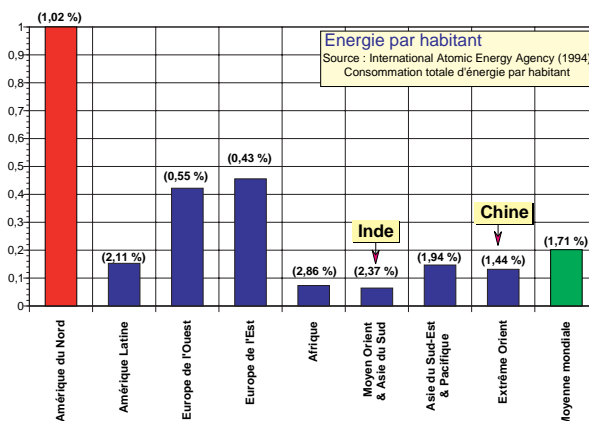


Figure 13 : Distribution géographique de la consommation d'énergie par habitant, normalisée à celle de l'Amérique du Nord. Les chiffres entre parenthèses donnent le taux d'accroissement annuel de la population qui, lui, est anticorrélé avec le développement.

Si d'ici à la fin du 21^e siècle tous les habitants de la planète consommaient seulement la moitié de ce que consomme un citoyen américain aujourd'hui, la consommation énergétique mondiale devrait être multipliée par un facteur 5 !

6– Rôle de l'électricité dans la consommation d'énergie

Puisqu'on inaugure aujourd'hui un institut dédié à l'étude de l'énergie électrique, il est intéressant de constater que l'électricité joue le rôle principal dans la consommation d'énergie. Ses débuts remontent à quelque 2600 ans, mais c'est seulement depuis environ un siècle qu'on s'est mis à l'utiliser à grande échelle. Quelques dates choisies de façon un peu arbitraire parmi la longue liste de contributions importantes (Ref. 4) permettent d'apprécier comment R&D et innovations se sont succédé.

- Au VI^e siècle avant Jésus-Christ, Thalès de Millet montre que l'ambre (*elektron*, en grec) frotté attire les corps légers.
- 1600, dans son traité *De magnete...*, l'anglais William Gilbert (1544-1603) découvre que des substances comme la résine, le soufre et le verre possèdent comme l'ambre la propriété d'attirer par frottement des corps légers. Il appelle ce phénomène « électricité ».
- 1800, l'Italien A. Volta (1745-1827) invente la pile électrique.
- 1821-1822, l'Anglais Michael Faraday (1791-1867) produit la rotation électromagnétique d'un conducteur ou d'un aimant (principe du moteur électrique). Le même Faraday découvre, en 1831, les lois de l'induction électromagnétique : véritable naissance de l'énergie électrique.
- 1861, Aristide Bergès (1833-1904) équipe une chute d'eau de 200 mètres à Lancey en France.
- 1876, premiers essais d'éclairage électrique, notamment à la Gare du Nord, à Paris.
- 1878, T. Edison et J. Swan inventent indépendamment la lampe à incandescence ; elle éclaire 45 mn et a coûté 40000 \$.
- 1882, Edison exploite la première centrale électrique à vapeur : Pearl Street à New York (400 lampes, 59 clients).
- 1883, premier transport d'énergie électrique à échelle industrielle par M. Deprez entre Vizille et Grenoble (14 km).
- 1890, Édouard Branly (1844-1940) invente un dispositif capable de détecter les ondes électromagnétiques : le cohéreur à limaille. Première ligne de métro à traction électrique à Londres.
- 1897, J.J. Thomson découvre l'électron et détermine le rapport de la charge de l'électron à sa masse.
- 1899, la voiture électrique, la « Jamais Contente », du comte d'origine belge Jenatzy atteint 106 km/h.
- 1906, exécution du premier condamné à mort par électrocution, le 6 août, dans l'État de New York.
- 1907, l'ingénieur américain Lee de Forest dépose le brevet de la « lampe à trois électrodes ». Naissance de l'ère de l'électronique.
- 1939, la télévision entièrement électronique apparaît aux États-Unis, en Angleterre, en Allemagne et en France.
- 1943, les Américains J.-P. Eckert et J. Mauchly construisent le premier ordinateur électronique Eniac (Electronic Numeral Integrator and Calculator).
- 1947, invention du transistor par une équipe des Bell Telephone Laboratories, sous la direction de John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley. Une nouvelle ère technologique s'ouvre : celle des semi-conducteurs.
- 1951, aux États-Unis, le premier réacteur nucléaire expérimental du monde à uranium très enrichi entraîne une turbine faisant tourner un alternateur d'une puissance de 100 kW.
- 1954, première centrale électrique civile nucléaire à Obninsk, URSS, d'une puissance de 5 MW.

L'augmentation du niveau de vie s'est accompagnée d'une forte croissance de la consommation d'énergie sous forme d'électricité, dont la fraction (aujourd'hui environ 34 %, dont 5,5 % d'origine nucléaire) croît avec le temps et avec le développement. Non seulement cette fraction croît plus rapidement dans les PVD, mais elle croît plus rapidement que leur PNB (car elle est en partie due à l'urbanisation).

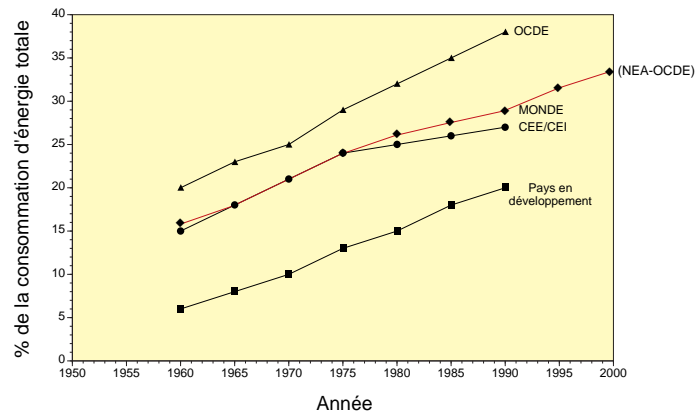


Figure 14 : Fraction d'énergie consommée sous forme d'électricité.

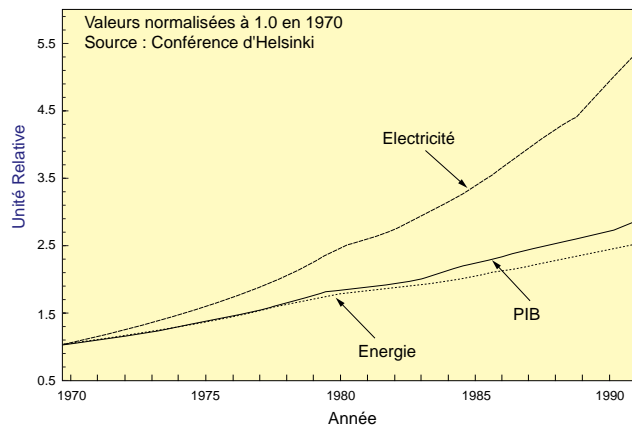


Figure 15 : Consommation d'énergie, d'électricité et PIB pour les pays en voie de développement.

Le gouvernement chinois estimait, à la fin des années 1990, que la production d'électricité de la Chine devrait augmenter d'un facteur 6 à 7 dans les 30 années à venir. Le problème est du même ordre en Inde. Ces deux pays, à eux seuls, représentent environ 40 % de la population mondiale.

7- Ressources énergétiques

Bien que les ressources énergétiques non renouvelables soient limitées, elles sont encore considérables en ce qui concerne les énergies fossiles. Les réserves en uranium, quant à elles, sont certainement insuffisantes pour imaginer un déploiement à grande échelle des centrales nucléaires actuelles, principalement des REP.

Tableau 1 : Réserves énergétiques mondiales non renouvelables.

(Source : BP Statistical Review)	Réserves prouvées (1999)	Production (1999)	Durée de vie (années)
Combustibles minéraux	498 Gtep ^y	2137 Mtep [^]	223
Pétrole	140 Gtep	3190 Mtep	40
Gaz (en volume)	146 Tm ³	2422 Gm ³	60
Uranium naturel (croûte terrestre)	4 Mtonne	—	Années ou siècles ^a

(a) Suivant le mode d'utilisation. Si toute l'électricité était produite par des REP, ces réserves ne dureraient qu'une quinzaine d'années ! Une quinzaine de siècles avec de la surgénération ! On trouve aussi 4,5 milliards de tonnes d'uranium dans l'eau des océans ! (3,3 mg/m³)

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) (Ref. 5) :

^y milliard de tep (tonne-équivalent-pétrole) ; 1 tep = 42 milliards de joules

[^] million de tep

« Le monde possède des réserves abondantes d'énergie. Les réserves prouvées sont suffisantes pour faire face à la demande bien au-delà de 2020 [toujours 20 ans de réserves!]. L'incertitude principale est sur le prix de revient : les progrès de la technologie et de la productivité le diminuent mais l'épuisement des réserves a tendance à l'augmenter. L'autre facteur clé est le prix de vente qui dépend du marché, de la cartellisation partielle du marché du pétrole, etc. Des investissements massifs dans la production, la transformation, le transport et la distribution d'énergie seront toutefois nécessaires pour faire face à l'augmentation de la consommation. Le commerce international de l'énergie devra surmonter les impératifs de sécurité. Il devra s'intensifier rapidement en raison de l'écart géographique entre le lieu de production et celui de la demande (politique internationale). L'Europe et l'Amérique du Nord verront une croissance de leur dépendance vis-à-vis de l'importation de gaz naturel. »

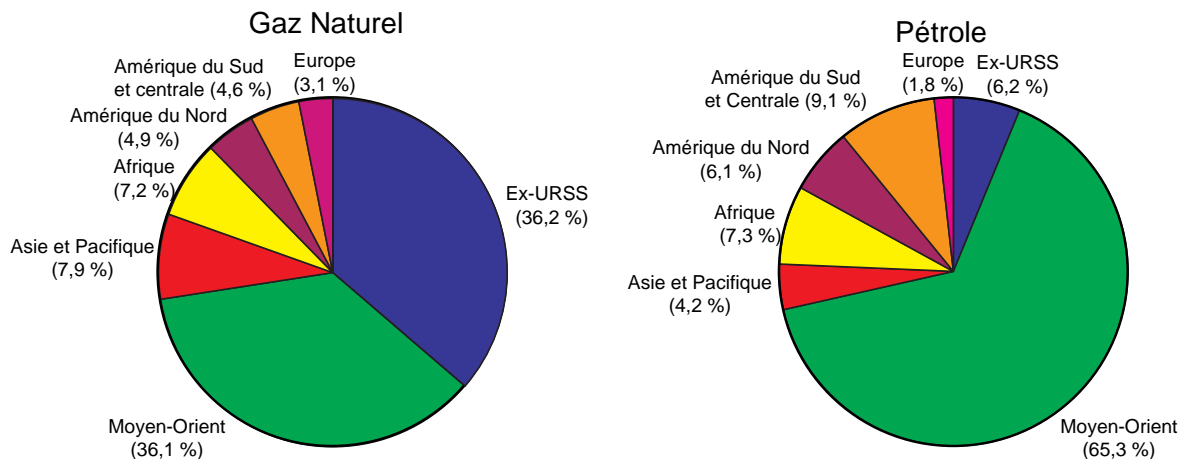


Figure 16 : Réerves connues en pétrole et en gaz naturel dans le monde ; l'Europe est particulièrement dépourvue.

Le problème de l'énergie n'est donc pas l'insuffisance à court ou moyen terme des ressources énergétiques mondiales, même si la consommation mondiale est déjà considérable. A mon avis, le problème de l'énergie s'énonce plutôt comme un grand défi : « Comment subvenir aux besoins énergétiques présents et futurs sans compromettre l'équilibre écologique de la planète ? Comment assurer également que des ressources énergétiques acceptables soient distribuées de façon équitable parmi tous les pays, y compris ceux en voie de développement ? »

Ce n'est pas la première fois que le problème de l'énergie se pose. La Grèce a connu une pénurie de bois au 5^e siècle avant J.C. Au 4^e siècle avant J.C. on en vient même à interdire de brûler du bois d'olivier, et apparaît alors la première utilisation de l'énergie solaire pour chauffer les maisons. Le bois jouait alors le rôle que pétrole et gaz jouent aujourd'hui. La grande différence est qu'aujourd'hui le problème est planétaire, avec des conséquences planétaires.

8- Impact écologique de la production d'énergie

En vue de l'accroissement spectaculaire et inévitable de la consommation d'énergie dans les années à venir, si les pratiques actuelles continuent (scénario probable dans le court terme), la pollution de la planète sera dramatique.

La prédominance de l'utilisation des combustibles fossiles implique des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, etc.), dont les conséquences catastrophiques sont un réchauffement global et extrêmement rapide de la planète, ainsi que des émissions chimiques (SO_x, NO_x, cendres, poussières, etc.) entraînant la pollution de l'air et de l'eau.

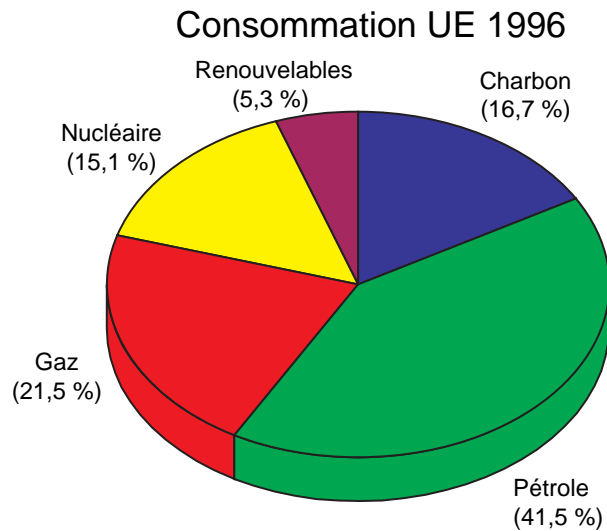


Figure 17 : L'énergie fossile représentait 80 % de la consommation Européenne en 1996, et elle continue à augmenter.

L'effet de serre est dû à la capacité de l'atmosphère terrestre à être relativement transparente au rayonnement solaire tout en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la terre. Le principal responsable de l'effet de serre est la vapeur d'eau atmosphérique, sans laquelle la température moyenne de la planète serait environ 33°C plus basse (-18°C au lieu de +15°C) ; cela aurait rendu l'apparition de la vie très difficile. Le problème d'aujourd'hui est qu'il semble que les activités humaines soient en train de modifier, par l'augmentation rapide de la concentration de gaz à effet de serre, l'équilibre écologique de la planète. Les principaux responsables ont différents potentiels de réchauffement¹ : CO₂ : 1 ; CH₄ : 21 ; N₂O : 310 ; CFC : 8000 ; ces derniers sont interdits depuis la Conférence de Montréal pour protéger la couche d'ozone. Malheureusement leurs substituts HCDC et hydrofluorocarbone (HFC) ont un redoutable effet de serre. Les mesures faites dans des carottes de glace (Antarctique) remontant jusqu'à 400000 ans montrent clairement une forte corrélation entre la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et la température moyenne de la planète.

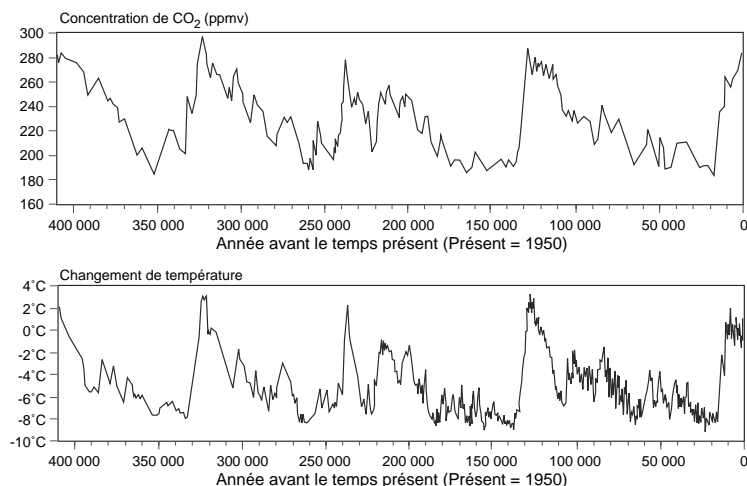


Figure 18 : Corrélation entre concentration de CO₂ atmosphérique et température depuis 400000 ans (carotte de glace de l'Antarctique, Ref. 6) ; l'homme existe depuis 10 fois plus longtemps et a survécu à 5 périodes glaciaires.

¹ Une quantité donnée de CO₂ produit par effet de serre environ 100 fois l'énergie dont elle a été le résultat ; voir R.L. Garwin & G. Charpak, Megawatts and Megatons, A. A. Knopf, New York (2001).

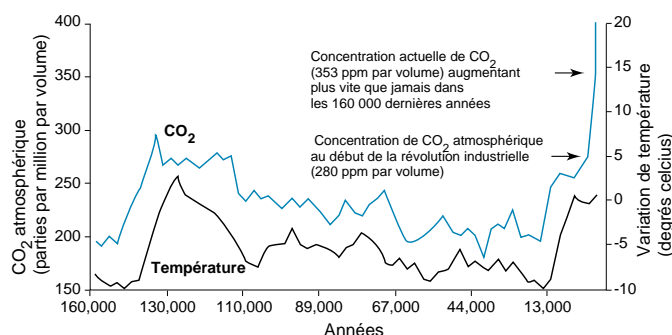


Figure 19 : Données provenant d'une carotte de glace prélevée au pôle (Ref. 7).

Le niveau de CO₂ dans l'atmosphère n'a jamais été aussi élevé depuis 20 millions d'années, et il pourrait même atteindre le niveau de la période de l'éocène (il y a 50 millions d'années) d'ici à 2100 !

La mesure de la température de l'air à la surface du sol et à la surface des océans de 1861 à 1998, avec comparaison à la moyenne 1961-1990 montre un réchauffement évident, bien qu'il ne soit pas uniforme (plus important entre 40° et 70° de latitude Nord). L'urbanisation et la désertification ne peuvent avoir contribué qu'à une petite fraction du réchauffement observé, c'est donc à l'effet de serre qu'il est attribué.

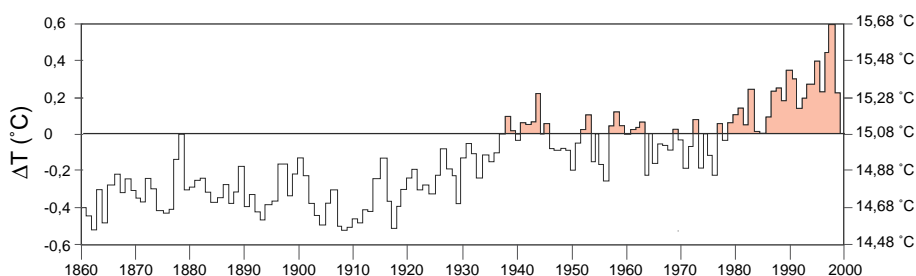


Figure 20 : Evolution de la température globale moyenne à la surface de la planète depuis 1880, comparée à la moyenne 1961-1990 (Ref. 8).

Bien que l'augmentation de température soit encore faible (IPCC : +0,3 à +0,6 °C depuis le début de l'ère industrielle), elle est cohérente avec l'hypothèse qu'elle est due à l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre.

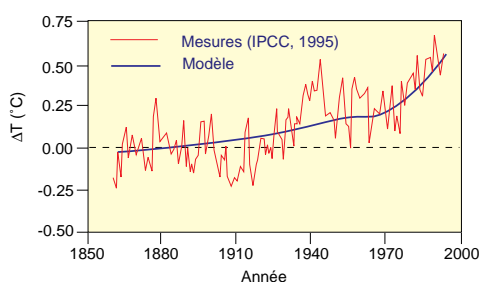


Figure 21 : Comparaison des mesures de température de l'IPCC¹⁾ et d'un modèle de simulation, basé sur l'augmentation des gaz à effets de serre.

Les indices tangibles du réchauffement sont nombreux, y compris en Suisse : recul spectaculaire des glaciers alpins (-25 % en 30 ans) ; avancée de la date de la première feuille de l'année des marronniers de la place

¹⁾ Intergovernmental Panel on Climate Change, créé en 1988 par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et UNEP (United Nations Environment Programme)

du Gouvernement (La Treille), enregistrée chaque année par le Sautier¹¹ de la République de Genève. Toutes les indications vont dans le même sens.

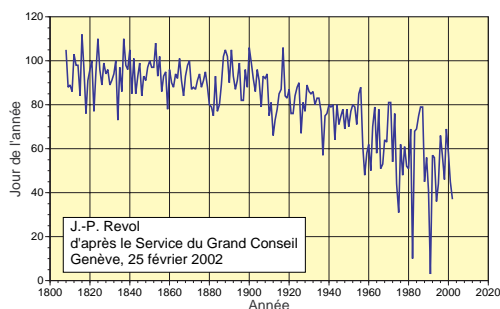


Figure 22 : Date d'apparition de la première feuille du marronnier de la Treille (Ref. 9).

L'homme est-il responsable du réchauffement climatique ? Cela fait peu de doute. Les taux de variation de la population, de la consommation d'énergie, de la production de CO₂ et de la température moyenne sont tous cohérents. Aujourd'hui, il est généralement accepté (IPCC), que la planète est en train de se réchauffer à un rythme environ deux ordres de grandeur plus rapide que pour tous les réchauffements vécus depuis des millions d'années. C'est une situation totalement nouvelle. La grande difficulté est de pouvoir prédire avec précision quels seront les effets de ce réchauffement brutal sur l'écologie de la planète en général, sur le climat, l'économie, l'agriculture, la santé, les relations internationales, donc sur le développement harmonieux de la civilisation.

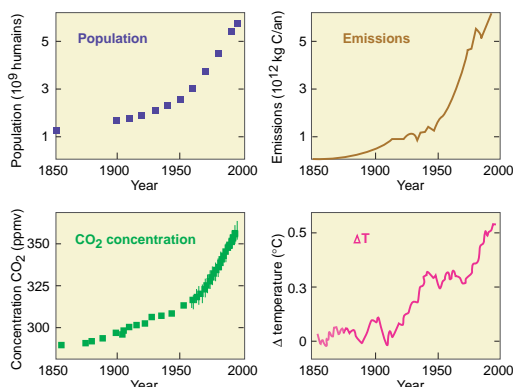


Figure 23 : Evolution entre 1850 et 2000 de la population mondiale, des émissions, de la concentration atmosphérique du CO₂ et de l'évolution de la température globale (Ref. 3).

Aujourd'hui le principe de précaution devrait prévaloir, car si rien n'est fait les conséquences de ces changements seront probablement désastreuses et d'autant plus désagréables que nous nous livrons à une expérience incontrôlée, tout en étant nous-mêmes à l'intérieur de l'éprouvette. L'IPCC prévoit, d'ici à 2100, entre autres :

- une hausse de température moyenne de 1 à 3,5 °C (nous ne sommes qu'à 9°C de la dernière période glaciaire !),
- une hausse du niveau des océans de 15 à 95 cm (la raison principale n'étant pas la fonte des calottes glaciaires mais la dilatation de l'eau due au changement de température),
- des sécheresses et des inondations plus sévères et plus fréquentes, accompagnées de plus grandes instabilités du climat dues au fait qu'une plus grande énergie potentielle est stockée dans l'atmosphère ainsi qu'une plus grande quantité d'humidité ; peut-être un changement de direction du Gulf Stream s'accompagnant d'un nouvel âge glaciaire en Europe ?

¹¹ Le sautier était, dès le XV^e siècle, le chef des guets et le gardien de la Maison de ville, où il était logé. Il faisait exécuter les ordres du Conseil et portait une livrée aux couleurs de la ville. Le sautier actuel est le 70^e.

9– Quelle stratégie choisir face au réchauffement global de la planète ?

Faut-il fermer les yeux et minimiser l'importance des conséquences ? C'est apparemment là l'attitude des Etats-Unis, peut-être motivée par une récente prévision sur l'effet des changements climatiques sur l'Amérique du Nord (Ref. 10) :

« Positive impacts will possibly be associated with climate changes such as warmer winters in the North, more precipitations in the Southwest and longer growing seasons in parts of the nation where agriculture and forestry are important »

L'alternative est de combattre le réchauffement. L'opinion dominante (Kyoto) consiste à vouloir réduire les émissions de CO₂ par (1) des économies d'énergie et des améliorations de l'efficacité des technologies, (2) une augmentation de la part des énergies renouvelables, et (3) une réduction de l'utilisation du charbon (augmentation de l'utilisation du gaz). Malheureusement, la tendance actuelle ne correspond pas à ce que les ministres concernés avaient espéré. Ainsi, l'OCDE a prévu une augmentation importante de la consommation des énergies fossiles entre 1992 et 2010 : gaz + 55 %, charbon + 66 %. Le problème ne pourra donc pas être résolu par de simples mesures politiques (taxes et économies d'énergie).

En dépit de toutes les grandes déclarations d'intentions, il semble bien que l'attitude qui prévaut soit la passivité. Les changements climatiques sont trop lents pour pouvoir motiver suffisamment les opinions publiques.

Carlo Rubbia, président de l'ENEA en Italie, recommande quant à lui une approche plus vigoureuse que celle de Kyoto, basée sur trois axes (Ref. 3) :

(1) **Réduction des effets des combustibles fossiles** : une tâche urgente, au vu de leur prédominance, et du fait que développer une nouvelle source d'énergie demande du temps, (a) en améliorant les rendements : facteur potentiel 1,5 à 2 dans la production d'électricité, 2 dans les transports grâce aux piles à combustibles (40 % contre 17 % pour le moteur à combustion) ; et (b) en capturant et séquestrant le CO₂, ce qui permettrait l'utilisation du charbon, la plus abondante des ressources fossiles.

(2) **Appel aux énergies renouvelables** : la terre reçoit du soleil une puissance énergétique moyenne d'environ 10¹⁷ W, soit 10000 fois plus que la puissance énergétique consommée dans le monde. En moyenne 200 watt/m² se retrouvent au niveau du sol. Les facteurs clés du succès dans ce domaine sont rendement de conversion en électricité et stockage de l'énergie, ce qui plaide en faveur du solaire basé sur la concentration thermique (□□□□□□□□ supérieur à □□□ □), plutôt que le photovoltaïque. La concentration thermique est une technique prometteuse qui permet de transformer l'énergie solaire hautement fluctuante en une source d'énergie disponible en continu.



Figure 24 : Kramer Junction Solar Plant, USA (source : site de l'ENEA : <http://www.enea.it>).

Le défi dans le domaine du solaire consiste à découpler la récolte d'énergie thermique de la production d'énergie électrique. Les miroirs paraboliques linéaires (trough) construits aux Etats-Unis sont un exemple qui pourrait atteindre une puissance de pointe de 500 MW_{th} par km². Un stockage (thermique) efficace fournirait une puissance thermique moyenne de 200 MW_{th} par km². Pour un rendement de conversion de 40 %, on pourrait donc produire une puissance électrique de 80 MWe. La surface nécessaire pour 1 GWe (la puissance typique d'une tranche de réacteur à eau pressurisée) serait de 12 km², ce qui représente un progrès important par rapport aux

ce qui demande un vaste effort de R&D » Carlo Rubbia.

L'hydrogène est probablement appelé à jouer un rôle important dans le futur. Ce serait un combustible idéal du point de vue de la pollution, puisque sa combustion ne produit que de l'eau : $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. De plus, il peut être utilisé à haut rendement, de l'ordre de 40 %, dans des piles à combustible. Il peut être distribué et stocké sous forme de gaz ou de liquide, ou même imprégné dans un matériau approprié. A long terme, l'hydrogène pourrait remplacer les combustibles fossiles, comme le prévoient C. Marchetti (Ref. 11), C. Rubbia (Ref. 3), etc. Il faudra donc disposer d'une source d'énergie acceptable qui permette de produire l'hydrogène nécessaire (produire de l'hydrogène nécessite de l'énergie) et développer un ensemble de technologies appropriées, en matière de transport, d'utilisation, de sécurité, etc. Cette forme d'énergie acceptable pourrait être l'énergie provenant de la fission nucléaire.

En résumé, le problème de l'énergie est un problème planétaire, la pollution atmosphérique ne s'arrête pas aux frontières. En Europe et aux Etats-Unis, où l'énergie est disponible en abondance, à un prix relativement faible et où l'on pense qu'on parviendra à maîtriser l'augmentation de la consommation, on n'est pas encore suffisamment sensibilisé à l'aspect global du problème ni à la différence entre la problématique des PVD et celle des pays les plus développés. Les pays développés ont en fait perdu le contrôle du futur écologique de la planète. En 1990, les PVD ne consommaient que le quart de l'énergie mondiale, en 2020 ils en consommeront déjà 60 %. Les pays développés ont non seulement intérêt à aider les PVD dans cet effort de recherche, mais c'est aussi un devoir moral que de le faire. L'attitude qui consiste à leur dire « ne faites pas ce que nous avons fait jusqu'à maintenant » n'est pas défendable. De nouvelles méthodes (technologies) devront être inventées pour produire suffisamment d'énergie à un prix compétitif et par des moyens acceptables pour l'environnement. Quoi qu'il en soit, tôt ou tard (≤ 50 ans pour le pétrole), les ressources fossiles vont s'épuiser. Il faudra bien les remplacer.

10– La problématique de l'énergie nucléaire

(La suite de l'article peut être trouvée dans l'article complet paru dans la revue énergie)

16– Références

- 1) C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono, N. Fiétier, J. Galvez, C. Gelès, Y. Kadi, R. Klapisch, P. Mandrillon, J.-P. Revol and C. Roche; « Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier », CERN/AT/95-44 (ET) et « CERN Group Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier »; Published by IAEA in "Accelerator driven systems: Energy generation and transmutation of nuclear waste", Status Report, IAEA-TECDOC-985, November 1997.
- 2) Une discussion sur la responsabilité du scientifique et sur le rôle de la science dans notre société peut être trouvée dans : J.-P. Revol, « The Main Role of Science in the 1990's », Workshop on Science in the Future of Europe, the Hungarian Academy of Sciences, edited by E. Sylvester Vizi, published by Akadémiai Kiado (1994).
- 3) Carlo Rubbia, Présentation à l'occasion du 50^e anniversaire du CEA, Saclay, 24 octobre 2002.
- 4) Communication privée de Madame Sophie Coeuré, de la Fondation EDF.
- 5) « World Energy Outlook 2001 » publié par l'Agence Internationale de l'Energie.
- 6) J.P. Petit et al., Climate & Atmospheric history of the last 420000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3JUre), pp. 429-436, 1999.
- 7) H. Lehmann, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- 8) School of Environmental Sciences, Climatic Research Unit, U. of East Engle, Norwich, UK, 1999.
- 9) Archives du Grand Conseil, Genève.
- 10) Climate Change Impacts on the United States, a Report of the National Assessment Synthesis Team, Cambridge U. Press, (2000).
- 11) Cesare Marchetti, « The Future of Hydrogen », May 1986, Proc. of the Hydrogen Link Conference of the Hydrogen Industry Council, Montreal, 24-26 mars 1986.
- 12) S. Andriamonje et al., Phys. Lett. B348 (1995) 697-709.
- 13) A. Abanades et al., "Results from the TARC experiment: spallation neutron phenomenology in lead and neutron-driven nuclear transmutation by adiabatic resonance crossing", NIM A 478 (2002) 577-

- 730; H. Arnould et al., Phys. Lett. B458 (1999) 167-180; H. Arnould et al., "Neutron-Driven Nuclear Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing", CERN-SL-99-036 EET, July 26, 1999 and Report to the European Union, DGXII, EUR 19117 EN.
- 14) C. Rubbia et al., "A High Resolution Spallation Driven Facility at the CERN-PS to Measure Neutron Cross Sections in the Interval from 1 eV to 250 MeV", CERN/LHC/98-02 (EET), 30 mai 1998; "A High Resolution Spallation Driven Facility at the CERN-PS to Measure Neutron Cross Sections in the Interval from 1 eV to 250 MeV: A Relative Performance Assessment", CERN/LHC/98-02 (EET)-add. 1, 15 juin 1998; S. Abramovich et al., "Proposal for a Neutron Time of Flight Facility", CERN/SPSC 99-8, SPSC/P 310, 17 mars 1999.
 - 15) C. Rubbia et al., CERN/LHC/97-01 (EET) (the case of Spain).
 - 16) C. Rubbia, « A Comparison of the Safety and Environmental Advantages of the Energy Amplifier and of Magnetic Confinement Fusion », CERN/AT/96-58 (ET), 29 décembre 1995.
 - 17) T. Hijikata et al., « Development of Pyrometallurgical Partitioning of Actinides from High-Level Radioactive Waste », Proc. of Global '93, publié par American Nuclear Society, Inc., Vol.2, p.1074.
 - 18) C. Rubbia, "Resonance Enhanced Neutron Captures for Element Activation and Waste Transmutation", CERN/LHC/97-04 (EET), 22 juin 1997.