

L'ÉNERGIE DE DEMAIN

TECHNIQUES - ENVIRONNEMENT - ÉCONOMIE

sous la direction de

Jean-Louis BOBIN

Elisabeth HUFFER

Hervé NIFENECKER



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences poursuit un triple objectif :

- réaliser des ouvrages correspondant à un projet clairement défini, sans contrainte de mode ou de programme,
- garantir les qualités scientifique et pédagogique des ouvrages retenus,
- proposer des ouvrages à un prix accessible au public le plus large possible.

Chaque projet est sélectionné au niveau de Grenoble Sciences avec le concours de referees anonymes. Puis les auteurs travaillent pendant une année (en moyenne) avec les membres d'un comité de lecture interactif, dont les noms apparaissent au début de l'ouvrage. Celui-ci est ensuite publié chez l'éditeur le plus adapté.

(Contact : Tél. : (33)4 76 51 46 95 - E-mail : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr)

Deux collections existent chez EDP Sciences :

- la **Collection Grenoble Sciences**, connue pour son originalité de projets et sa qualité
- **Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques**, collection présentant des thèmes de recherche d'actualité, traités par des scientifiques de premier plan issus de disciplines différentes.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

Comité de lecture pour "L'Énergie de demain"

L'ouvrage *L'Énergie de demain* a tout d'abord bénéficié des travaux du groupe Énergie de la Société Française de Physique. Il a ensuite été pris en charge par l'équipe de Grenoble Sciences avec une contribution particulière de :

- ♦ **Cyrille BOULLIER**, Ingénieur de l'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la Ville de Paris,
- ♦ **David VEMPAIRE**, Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Physique de Grenoble,
- ♦ **Michaël WERNLI**, Ingénieur de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Une analyse critique fut également fournie par l'Alliance Université-Entreprise de Grenoble (AUEG), présidée par René MEYZENC et plus particulièrement par :

- ♦ **Georges LESPINARD**, Professeur émérite de l'Institut National Polytechnique de Grenoble

Grenoble Sciences est soutenu par **le Ministère de l'Éducation nationale**
le Ministère de la Recherche et **la Région Rhône-Alpes**
Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**

Ouvrage publié avec le concours du **Centre National du Livre**

Réalisation et mise en pages : **Centre technique Grenoble Sciences**

Illustration de couverture : **Alice GIRAUD**

Ev8897: Image courtesy of Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center
(<http://eol.jsc.nasa.gov>)

ISBN 2-86883-771-9

© EDP Sciences, 2005

EXTRAITS

2 - LES MULTIPLES VISAGES DE L'ÉNERGIE

Roger BALIAN

On rappelle, dans la perspective des applications, les principes physiques fondamentaux associés au concept d'énergie : premier principe et deuxième principe de la thermodynamique, dynamique des processus irréversibles, hiérarchie des interactions élémentaires. On examine leurs conséquences sur les questions d'énergétique en comparant les formes courantes de l'énergie du point de vue de leur concentration, de leur dégradation et de leur stockage. On insiste sur les valeurs caractéristiques des grandeurs en jeu.

<i>2.1 Conséquences énergétiques des principes fondamentaux</i>	14
<i>2.2 Comparaisons</i>	29
<i>Annexe - L'élaboration du concept d'énergie</i>	34

Ce chapitre introductif a pour but de mettre en évidence l'éclairage apporté par la physique sur les questions énergétiques. En deux siècles, l'énergie a envahi notre vie quotidienne, facilitant les transports, l'industrie, le chauffage ou les multiples usages domestiques de l'électricité. Les problèmes économiques, sanitaires, géopolitiques, technologiques qu'elle pose font la une des journaux. Pourtant, le discours sur l'énergie gagnerait en pertinence s'il s'appuyait mieux sur les données scientifiques qui sous-tendent sa « production » et son emploi, et qui sont trop fréquemment ignorées par les médias ou par les politiciens. Le physicien s'irrite souvent devant des affirmations simplistes en contradiction avec des ordres de grandeur qui devraient être connus de tous. Il est vrai que le concept d'énergie est l'un des plus **abstrait**s et des plus **multiformes** de la science et qu'il ne date que d'un siècle et demi ; ceci explique sans doute pourquoi l'enseignement n'est pas encore parvenu à rendre familières des notions de physique fondamentale qui sont essentielles à la formation du citoyen, dans un monde où l'énergie est omniprésente.

Comme on le voit en consultant dictionnaires ou encyclopédies, l'énergie ne peut être définie qu'indirectement. Bien qu'elle soit liée aux propriétés de la matière, c'est un objet mathématique abstrait. Nécessaire à une formulation précise du premier principe de la thermodynamique, elle apparaît à l'échelle microscopique comme une grandeur dynamique. Il s'agit d'une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de celui-ci à l'instant considéré ; elle dépend en particulier des positions et vitesses des

Lorsque l'on dispose de toutes les données statistiques pour l'appliquer à une économie nationale, la méthode permet de dissocier les variations d'activité, de structure ou de contenu qui sont à l'origine d'une variation de ENE/PIB. En figeant l'effet de structure, on peut évaluer l'effet technologique ou de contenu qui correspond à une variation d'efficacité du système d'approvisionnement. La principale difficulté méthodologique vient de l'incidence du degré de désagrégation du PIB sur le partage entre effets de structure et de contenu : plus ce degré est grand, plus l'effet de structure devient prépondérant et inversement.

3.2.2. L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Pour comprendre l'incidence de l'évolution de ENE/PIB sur la croissance de la consommation mondiale d'énergie, il faut essayer de reconstituer cette évolution sur une période de temps aussi longue que le permettent les statistiques disponibles [19].

Tableau VII - Taux de croissance ou décroissance de ENE/PIB (%)
[source : évaluations de l'auteur à partir des PIB d'Angus MADDISON]

	<i>Amérique latine</i>	<i>Amérique du Nord</i>	<i>Asie</i>	<i>Europe de l'Ouest</i>	<i>Europe de l'Est</i>	<i>Monde</i>
<i>1820-1870</i>		-0,3		0,3		0,2
<i>1870-1913</i>	-1,2	-0,8	-0,3	0,3	-0,2	0,0
<i>1913-1950</i>	-0,9	-1,0	-0,3	-1,3	-1,6	-0,9
<i>1950-1973</i>	-1,3	-0,6	-0,8	-0,3	1,3	-0,4
<i>1973-1990</i>	0,2	-2,5	-0,8	-1,9	0,7	-1,3
<i>1990-2000</i>	0,6	-1,7	-1,5	-1,3	0,8	-1,2

Quelques grandes tendances se dégagent des évaluations ci-dessus :

- ▶ à l'échelle mondiale, l'intensité énergétique n'a crû qu'au XIX^e siècle, c'est-à-dire quand l'Europe s'est industrialisée en recourant massivement à un charbon minéral utilisé de façon très peu efficace (le rendement initial de la machine à vapeur était inférieur à 1%) ; au cours du XX^e siècle, l'intensité n'a crû que dans quelques régions, dont l'Europe de l'Est qui a donné priorité au développement des industries lourdes sans aucun souci de productivité, et plus récemment l'Amérique latine pour des raisons tenant surtout à ses crises économiques ;
- ▶ en général, la baisse s'est accentuée d'une période à l'autre, sauf lorsque la diminution du prix relatif de l'énergie a découragé la recherche d'une plus grande efficacité énergétique, ce qui a été le cas entre 1950 et 1973, avec la construction d'immeubles qualifiés de « véritables passoires thermiques » ou celle d'automobiles consommant de 20 à 30 litres d'essence au kilomètre, notamment aux États-Unis ;

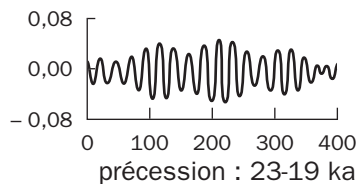
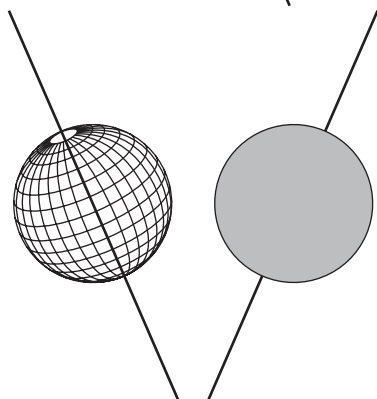
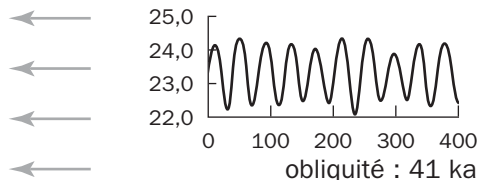
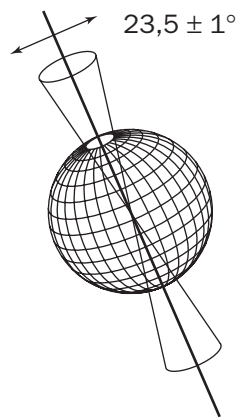
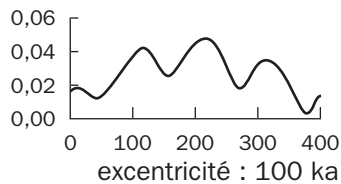
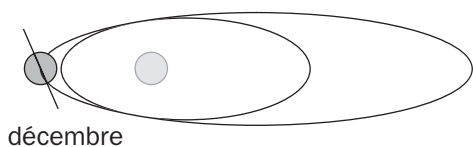
Tableau IX - Evolution de la consommation d'énergie primaire entre 1980 et 2000, par zone géographique (les ensembles politiques les plus importants sont aussi donnés)

Les consommations par habitant sont présentées, c'est leur augmentation qui est utilisée pour extrapoler la consommation d'énergie primaire à l'horizon 2050. Due à la probable exagération de la population de l'Asie, sa consommation d'énergie primaire est sans doute trop élevée. Il n'en reste pas moins que c'est bien là que se jouera l'avenir énergétique.

Pays	En. prim. [Mtep]		En. prim./hab. [tep]		En. prim./hab. [tep]	En. prim. [Mtep]
	1980	2000	1980	2000	2050	2050
	<i>Etats-Unis</i>	1962	2483	8,61	8,82	9,37
<i>Amérique du Nord</i>	2293	2967	7,13	7,19	7,34	5647
<i>Brésil</i>	101	226	0,83	1,35	4,48	1691
<i>Amérique centrale et du Sud</i>	286	525	0,99	1,26	2,31	2382
<i>U.E.</i>	1338	1587	3,72	4,17	5,53	2430
<i>Europe de l'Ouest</i>	1467	1788	3,42	3,76	4,78	2933
<i>Ex-URSS</i>	1165	1021	4,39	3,52	2,02	734
<i>Moyen-Orient</i>	147	432	1,59	2,57	5,00	3761
<i>Afrique</i>	170	299	0,35	0,38	0,44	1224
<i>Chine</i>	432	924	0,44	0,72	2,55	6167
<i>Inde</i>	104	317	0,15	0,32	1,90	5115
<i>Japon</i>	381	544	3,26	4,29	8,50	1327
<i>Extrême-Orient et Océanie</i>	1224	2699	0,50	0,79	2,52	19484
Total mondial	7122	9972	1,61	1,64	1,74	35432

Le **tableau X** montre une augmentation considérable des émissions de gaz carbonique. Cette augmentation pose une double question :

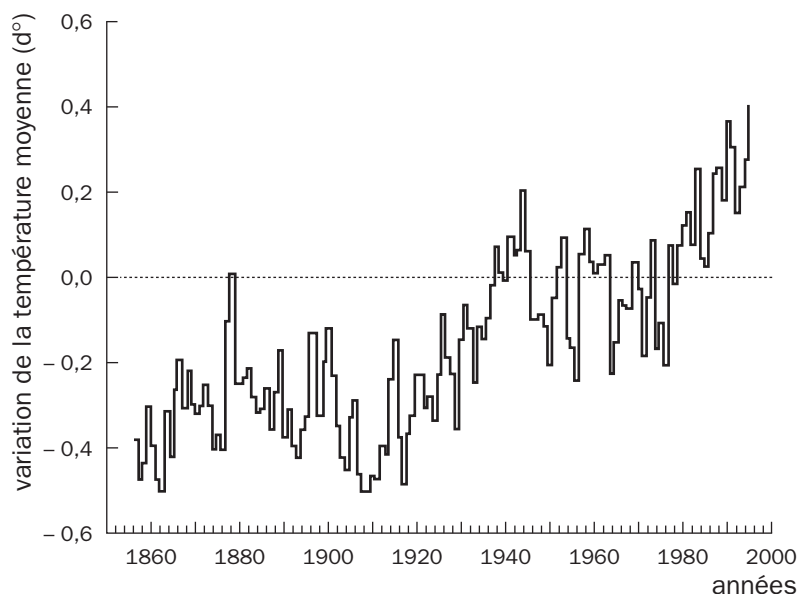
- ▶ les réserves de combustibles fossiles seront-elles suffisantes pour permettre le niveau de consommation correspondant à ces émissions ? Si les réserves conventionnelles en pétrole et gaz risquent, en effet, d'être proches de l'épuisement en 2050, il n'en est de même ni pour le charbon, ni pour les réserves non-conventionnelles (huiles lourdes, schistes bitumineux, hydrates de méthane). On peut donc s'attendre à une augmentation à terme, en terme relatif comme en terme absolu de l'utilisation du charbon, éventuellement liquéfié ou gazéifié.
- ▶ Ces émissions massives de gaz carbonique sont-elles compatibles avec l'environnement ? La réponse est, ici, clairement négative quand on sait que la stabilisation de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère ne pourrait se faire, selon les prévisions du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), que si les émissions étaient ramenées en dessous de 3 gigatonnes



5.2 - Les mouvements de la Terre qui influencent l'insolation

Les périodes des différents mouvements sont indiquées en milliers d'années (ka).

Depuis 150 ans, la température de l'atmosphère est soigneusement suivie et enregistrée par des stations météorologiques en un grand nombre de points du globe. On calcule à partir de ces données des moyennes locales, régionales et planétaires. La **figure 5.3** montre, en fonction du temps, l'évolution de la moyenne annuelle planétaire. Mises à part des fluctuations de faible amplitude (0,2°C) d'une année sur l'autre, la température est restée à peu près stable jusqu'en 1920. Elle est passée par un maximum vers 1940 et s'accroît constamment depuis 1960. L'augmentation depuis lors est de 0,5°C.



5.3 - Evolution au cours du temps de la température en degrés Celsius (moyenne planétaire annuelle) depuis 1850 [source : GIEC, 1996]

Une conséquence déjà perceptible du réchauffement global est l'élévation du niveau moyen des océans. Cette élévation est due pour une part à la fonte des glaces, mais l'essentiel vient de la dilatation de l'eau. Pendant longtemps l'élévation du niveau de la mer était estimée à partir du changement du niveau des marées. Depuis 1992, les scientifiques disposent du satellite franco-américain Topex-Poséidon qui mesure avec grande précision le niveau des océans [10]. On a ainsi observé une élévation moyenne de 3,1 mm par an entre août 1992 et avril 1999. En extrapolant, on trouve une élévation de 30 cm par siècle, et cela dans le cas plutôt favorable où la température continuerait d'augmenter au rythme actuel. En revanche, si la situation continue d'évoluer dans un sens défavorable, on pourrait aboutir à une élévation beaucoup plus importante du niveau des mers. A terme, certains pays seraient ainsi menacés d'inondation : les Pays-Bas pour 6% de leur superficie, le Bangladesh pour 17,5%.

5.1.2. HISTOIRE DES CONCENTRATIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les détails de la composition de l'atmosphère sont bien connus depuis 1950, grâce à des mesures précises effectuées en différents endroits. Les concentrations des plus importants constituants font l'objet d'un suivi rigoureux. S'agissant d'un passé plus lointain, les concentrations sont reconstituées de façon crédible d'après l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces de la calotte polaire antarctique [11]. Dans les cas du CO₂ et du méthane, les variations sont fortement corrélées à celles de la température superficielle de la Terre, comme le montre la *figure 5.4*, graphi-

L'industrie pétrolière américaine, qui a de nombreux intérêts dans le monde entier, va malheureusement continuer à imposer ses méthodes archaïques en matière de publication des réserves, tant que la SEC n'imposera pas d'autres définitions. Les Européens ont toujours eu un complexe d'infériorité vis-à-vis des Américains en matière de pétrole !

Tableau I - Réserves et ressources d'énergies fossiles (en gigatonnes de charbon)
[source : World Energy Assessment, Energy and the challenge of sustainability, 2000
UNDP (United Nations Development Programme) et WEC (World Energy Council)]

Gigatonnes de charbon	Consommation		Réserves	Ressources ^(a)	Ressource totale ^(b)	Ressources additionnelles
	1860-1998	1998				
<i>Pétrole</i>						
<i>Conventionnel</i>	97	2,65	120	121	241	
<i>Non-conventionnel</i>	6	0,18	102	305	407	914
<i>Gaz naturel^(c)</i>						
<i>Conventionnel</i>	36	1,23	83	170	253	
<i>Non-conventionnel</i>	1	0,06	144	364	509	14 176
<i>Charbon</i>	155	2,4	533	4618	5151	
Total	294	6,53	983	5579	6562	15 090

(a) réserves à découvrir ou ressources devant évoluer en réserves (compilées par l'auteur) - (b) somme des réserves et ressources - (c) incluant le gaz naturel liquéfié.

8.4. MODÉLISATION DE LA PRODUCTION FUTURE

Les économistes oublient souvent que pour produire des combustibles fossiles, vous devez d'abord les découvrir. C'est donc les découvertes passées qui donnent les productions actuelles. La production future (c'est-à-dire les réserves restantes à produire et à découvrir) peut être modélisée de plusieurs façons.

8.4.1. UTILISATION UNIQUEMENT DES DONNÉES DE PRODUCTION ANNUELLE

Une courbe dite de HUBBERT (dérivée de la courbe logistique) est tracée au mieux pour intégrer les productions annuelles du passé. On obtient les réserves ultimes. L'hypothèse principale est que la production suit un seul cycle correspondant à une courbe en cloche (en fait courbe normale, car suivant le théorème de limite centrale, l'addition d'un grand nombre de productions de champs qui sont dissymétriques mais indépendants donne une courbe normale). Mais de nombreux pays montrent en fait un profil avec plusieurs cycles, seule la production des 48 Etats des Etats-Unis et hors *offshore* profond montre une courbe en cloche en dehors des crises économiques (dépression, choc pétrolier).

9.3. COMPOSITION

9.3.1. LES MINÉRAUX

Les minéraux sont des morceaux de roches, de tailles diverses, sédimentés en même temps que la matière organique. Ce sont des silico-aluminates : grès, schistes, tufs volcaniques... Après combustion, ces minéraux constituent les cendres et les scories. L'analyse des cendres révèle des éléments majeurs (silice, aluminium, calcium) et des éléments en trace : soufre, chlore, fluor, sodium ou phosphore, substances qui font l'objet de limites dans les spécifications contractuelles en raison de leur incidence sur l'environnement ou les procédés.

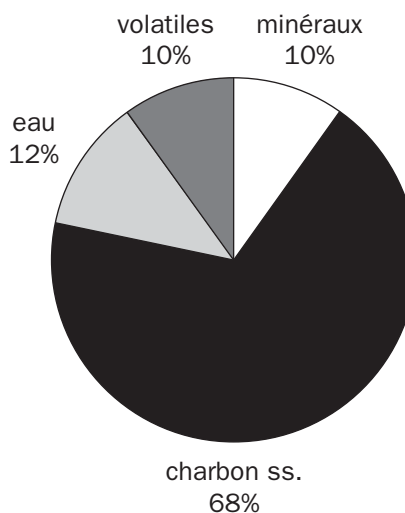
9.3.2. LA MATIÈRE ORGANIQUE

Le charbon au sens strict est la partie de couleur noire et d'origine organique. Suivant son aspect macroscopique on distingue :

- ▶ le fusain, fibreux, qui dérive de produits ligneux,
- ▶ le durain, mat, provenant de spores et de feuilles,
- ▶ le clarain, semi-brillant, et de même provenance,
- ▶ le vitrain, brillant, formé d'une gelée cellulosique amorphe.

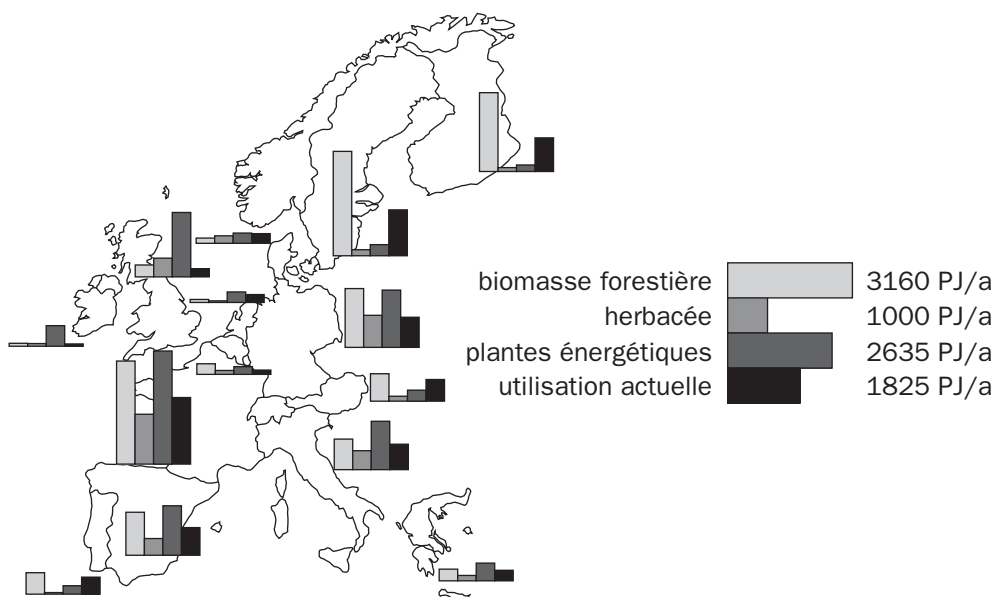
La minéralogie comporte deux constituants principaux : l'inertite et la vitrinite dont les proportions correspondent à une évolution vers des stades de plus en plus avancés. Le pouvoir réflecteur de la vitrinite Canada permet de classer les charbons en « *low rank* » (lignite) $R < 0,6\%$ et « *high rank* » (charbons bitumineux et anthracites) $R > 0,6\%$.

La composition chimique est caractérisée par une teneur en hydrogène (4%) équivalente à la moitié de celle des pétroles. La teneur en carbone sur sec varie de 55% pour les lignites, à 70% pour les bitumineux et 90% pour les anthracites.



9.1 - Composition moyenne du charbon

Pour l'ensemble de la Communauté européenne, une étude réalisée en 1998 [3], et illustrée par la **figure 13.2**, indique pour chaque pays la capacité annuelle de production forestière et agricole.



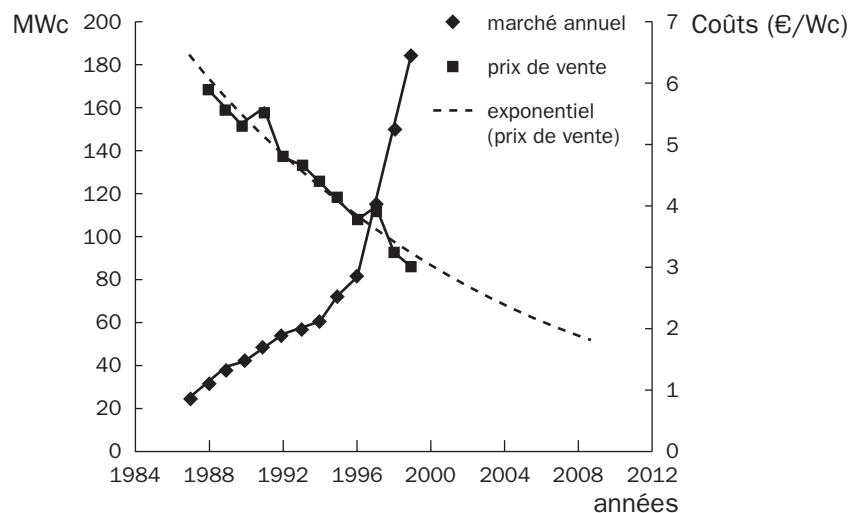
13.2 - Potentiels énergétiques inutilisés du bois, de la paille et des plantes énergétiques ; le montant total de la biomasse déjà utilisée en Europe est aussi donnée [1 PJ = 10¹⁵ J = 2.10⁴ tep]

Par rapport à une consommation courante de 1825 .10¹⁵ J/an (38 Mtep), la capacité totale de production est estimée à 8625 .10¹⁵ J/an (180 Mtep), ce qui, avec une progression d'un facteur voisin de 5, permettrait de couvrir 12% des besoins d'énergie primaire de la communauté.

La même **figure 13.2** montre, par ailleurs, que la France est le pays européen qui possède la ressource la plus importante, avec une part prépondérante du gisement agricole par rapport à un gisement forestier déjà important et équivalent à celui de la Suède ou de la Finlande.

Pour la France, la biomasse la plus abondante est constituée des plantes lignocellulosiques dont on peut distinguer trois origines principales (voir **figure 13.3**) :

- la biomasse forestière, dont l'exploitation en bois d'œuvre s'élève à 35 Mm³ environ alors que les 15 Mha de la forêt française sont capables de produire, annuellement, près de 65 Mm³ ;
- l'exploitation des rémanents forestiers et des bois de taillis, ainsi que les résidus des industries de transformation, pourraient très largement contribuer à la production d'énergie ;



17.4 - Evolution du coût des modules et de la production annuelle

17.2.5. DE LA CELLULE AU SYSTÈME : LES COMPOSANTS ET LE DIMENSIONNEMENT

En assemblant des cellules (36 en général), un module est fabriqué, qui prend place dans un système composé typiquement :

- ▶ d'un ou d'une série de modules placés sur des supports orientés vers le sud, à une inclinaison correspondant à la latitude +10° ;
- ▶ d'un stockage (application autonome) dans des batteries au plomb permettant d'assurer une autonomie énergétique complète. Pour les installations importantes, un générateur diesel est parfois prévu pour réduire la taille du stockage (système dit hybride) ;
- ▶ d'un régulateur limitant les charges et décharges excessives des batteries et optimisant la gestion de l'énergie ;
- ▶ d'une application, qui correspond progressivement à tous les besoins, familiaux ou professionnelles, de faible à moyenne puissance, rencontrés en utilisation autonome.

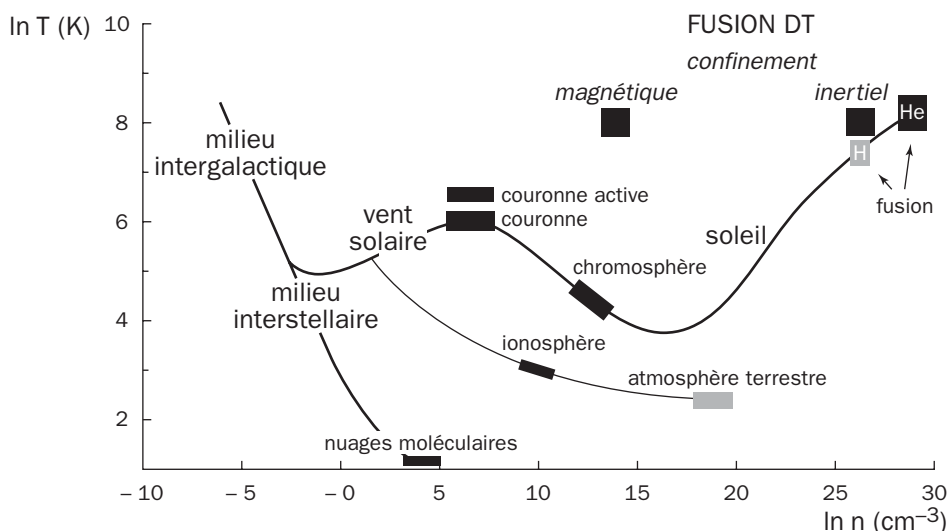
Le photovoltaïque raccordé au réseau débite en direct sur le réseau, à travers un onduleur transformant le courant continu en courant alternatif 220 V. Il n'y a pas besoin de batterie et régulateur.

Les données importantes à retenir sont les suivantes :

- ▶ la cellule Sic fournit un courant continu (0,8 V-1 à 3 Wc) proportionnel à l'éclairement reçu,
- ▶ un assemblage « série/parallèle » donne les courants et tensions souhaités : typiquement 12 V-50 Wc pour un module de 1 m × 0,4 m, composé de 36 cellules,

21.3. LA NATURE ET LES DÉCIDEURS

Pour imiter la Nature, il faut commencer par bien la connaître. Dans la perspective qui nous intéresse ici, on peut classer les milieux naturels les uns par rapport aux autres, au moyen d'un diagramme où sont portées, sur des échelles logarithmiques, la densité particulaire en abscisses et la température en ordonnées. Les conditions rencontrées dans l'Univers se situent autour d'une sorte de squelette représenté par les courbes continues de la *figure 21.2*.



21.2 - Plasmas naturels et plasmas de fusion

On note que les réactions de fusion thermonucléaire ne se développent que si la température et la densité ont les valeurs régnant au centre du Soleil ou des autres étoiles :

- ▶ température supérieure à 10^7 K permettant l'allumage et l'auto-entretien de la réaction,
- ▶ densité élevée (10^{25} à 10^{30} cm^{-3}).

La pression (hydrostatique) dans ces conditions est supérieure ou égale à 10^{14} Pa (10^9 bars). Elle surpasse, par de nombreux ordres de grandeurs, ce que les matériaux de notre environnement terrestre familier sont capables de supporter. Mais la force de gravitation due à son énorme masse compense la densité de puissance libérée par la transformation d'hydrogène en hélium, prévenant ainsi l'explosion d'un objet comme le Soleil.

Par contre, un Soleil en deutérium au lieu d'hydrogène exploserait à coup sûr !