

L'ÉNERGIE DE DEMAIN

**TECHNIQUES
ENVIRONNEMENT
ÉCONOMIE**



Sous la direction de

J.L. BOBIN – E. HUFFER – H. NIFENECKER

Groupe **ÉNERGIE** de la Société Française de Physique



L'ÉNERGIE DE DEMAIN
TECHNIQUES - ENVIRONNEMENT - ÉCONOMIE

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

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

Ouvrages Grenoble Sciences édités par EDP Sciences

Collection Grenoble Sciences

Chimie. Le minimum à savoir (*J. Le Coarer*) • Electrochimie des solides (*C. Déportes et al.*) • Thermodynamique chimique (*M. Oturan & M. Robert*) • CD de Thermodynamique chimique (*J.P. Damon & M. Vincens*) • Chimie organométallique (*D. Astruc*) • De l'atome à la réaction chimique (*sous la direction de R. Barlet*)

Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J.P. Franc et al.*) • La turbulence (*M. Lesieur*) • Magnétisme : I Fondements, II Matériaux et applications (*sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) • Du Soleil à la Terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) • Sous les feux du Soleil. Vers une météorologie de l'espace (*J. Liliensten & J. Bornarel*) • Mécanique. De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • La mécanique quantique. Problèmes résolus, T. 1 et 2 (*V.M. Galitsky, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Symétrie et propriétés physiques. Du principe de Curie aux brisures de symétrie (*J. Sivardière*)

Exercices corrigés d'analyse, T. 1 et 2 (*D. Alibert*) • Introduction aux variétés différentielles (*J. Lafontaine*) • Analyse numérique et équations différentielles (*J.P. Demailly*) • Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé (*F. & J.P. Bertrandias*) • Approximation hilbertienne. Splines, ondelettes, fractales (*M. Attéia & J. Gaches*) • Mathématiques pour l'étudiant scientifique, T. 1 et 2 (*Ph.J. Haug*) • Analyse statistique des données expérimentales (*K. Protassov*)

Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) • Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) • Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdetti*) • Eléments de biologie à l'usage d'autres disciplines (*P. Tracqui & J. Demongeot*) • Bioénergétique (*B. Guérin*) • Cinétique enzymatique (*A. Cornish-Bowden, M. Jamin & V. Saks*) • Biodégradations et métabolismes. Les bactéries pour les technologies de l'environnement (*J. Pelmont*)

La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites (*Ph. Foster*) • L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) • La biologie, des origines à nos jours (*P. Vignais*) • Naissance de la physique. De la Sicile à la Chine (*M. Soutif*) • Le régime oméga 3. Le programme alimentaire pour sauver notre santé (*A. Simopoulos, J. Robinson, M. de Lorgeril & P. Salen*) • Gestes et mouvements justes. Guide de l'ergomotricité pour tous (*M. Gendrier*)

Listening Comprehension for Scientific English (*J. Upjohn*) • Speaking Skills in Scientific English (*J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis*) • Minimum Competence in Scientific English (*S. Blattes, V. Jans & J. Upjohn*)

Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques

Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs et applications biologiques (*sous la direction de M. Comet & M. Vidal*) • Turbulence et déterminisme (*sous la direction de M. Lesieur*) • Méthodes et techniques de la chimie organique (*sous la direction de D. Astruc*)

AUTEURS

Jean-Louis BOBIN

Professeur honoraire à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris

Elisabeth HUFFER

Ingénieur, retraitée, Société Française de Physique, Paris

Hervé NIFENECKER

*Conseiller scientifique à l'IN2P3 (CNRS),
Laboratoire de Physique Sub-atomique et de Cosmologie (LPSC), Grenoble*

Jean-Marc AGATOR

Ingénieur Chef de projet au CEA, Paris

Thierry ALLEAU

Président de l'Association Française de l'Hydrogène (AFH₂), Grenoble

Denis BABUSIAUX

Professeur et Directeur de recherche à l'Institut Français du Pétrole, Paris

Pierre BACHER

Retraité, ancien Directeur délégué et Directeur de l'équipement de l'EDF

Roger BALIAN

*Membre de l'Académie des sciences,
Professeur au Service de Physique Théorique, CEA, Centre de Saclay*

François BAUTIN

Ingénieur à la division charbon de TOTAL, Paris

Diego DE BOURGUES

Directeur de la division charbon de TOTAL, Paris

Roger BRISSOT

Professeur à l'École Nationale Supérieure de Physique de Grenoble (ENSPG-INPG)

Gérard CLAUDET

Conseiller scientifique au CEA, Grenoble

Gérard DURUP

*Ingénieur d'Études Expert à Gaz de France, Département Stockages Souterrains,
Paris*

Jean-François FAUVARQUE

Professeur d'électrochimie industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Paris

Jean-Marc JANCOVICI

Ingénieur conseil, Orsay

Patrick JOURDE

Chercheur au CEA, Cadarache

Jean LAHERRÈRE

Retraité, ancien Directeur des Techniques Exploration de Total

Laurent LI

Chargé de recherche CNRS au Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris Jussieu

Daniel MADET

Chargé de mission-Direction Contrôle des Risques Groupe EDF, Le Vésinet

Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX

Ancien Directeur de recherche au CNRS, Grenoble

Roland MASSE

Ancien Président de l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI), membre de l'Académie des technologies et de l'Académie de médecine

Gérald OUZOUNIAN

Délégué régional Ile-de-France de l'ADEME

Ari RABL

Responsable scientifique ARMINES-École des Mines de Paris

Bruno RIVOIRE

Ingénieur de Recherche à l'Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés, CNRS, Paris

Michel ROSTAING

Conseiller scientifique à l'IEPE (Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie), CNRS, Grenoble

Joseph SPADARO

Chercheur au Centre d'Énergétique, École des Mines de Paris

Bernard TARDIEU

Président Directeur Général de Coyne et Bellier, Bureau d'Ingénieurs Conseils, Paris

Jean TEISSIÉ

Ingénieur retraité, ex-responsable technique mines de TOTAL

Bernard TISSOT

Membre de l'Académie des technologies, Président de la Commission Nationale d'Évaluation, Paris

PRÉFACE

Peut-on vivre sans énergie ? Bien sûr que non, répondront en chœur le physicien, le chimiste et le médecin : sans énergie, plus de liaisons nucléaires, plus de liaisons chimiques, plus de molécules, plus de mouvement, plus de chaleur, plus de digestion, donc certainement plus de vie !

L'impérieuse nécessité de disposer de sources d'énergie – à commencer par celle fournie à notre corps par notre alimentation – ne fait donc aucun doute : la vie, c'est avant tout de la chimie, et pour faire, conserver, et défaire les liaisons des molécules qui nous constituent, l'énergie est incontournable. Un monde sans énergie n'est tout simplement pas pensable ! En écho au titre de cet ouvrage, nous pouvons déjà dire que l'énergie de demain, ce sera celle qui existait déjà hier.

Mais au-delà de ce qui lui est nécessaire pour entretenir son propre corps, l'*homo industrialis* a aujourd'hui réussi à domestiquer, pour d'autres usages, à peu près toutes les formes d'énergie connues : l'énergie chimique (toutes les formes de combustion), l'énergie mécanique, l'énergie nucléaire, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique... Cette profusion énergétique est allée avec une explosion de la taille de l'humanité, passée de 400 millions d'habitants en 1800 à 6 milliards aujourd'hui, une multiplication de l'espérance de vie par 2 en deux siècles. Avec l'équivalent de 4 tonnes de pétrole par an, le Français « moyen » dispose de l'équivalent de 25 à 50 esclaves à sa disposition, qui s'appellent réfrigérateur, lave-linge, automobile, avion, chauffage central, robots industriels, bétonneuse..., et qui ont permis l'accession du moindre ouvrier occidental à un mode de vie en comparaison duquel un noble du Moyen Age était un vrai pauvre.

Mais en consommant à une vitesse accélérée des ressources qui ont mis des centaines de millions d'années à se constituer, en rendant le fonctionnement de notre monde moderne dépendant d'une abondance énergétique qui pourrait bien n'être que transitoire, en prenant le risque d'engendrer des perturbations climatiques majeures, n'avons-nous pas joué à FAUST, en vendant notre âme au Diable de la consommation de masse, contre une abondance de quelques siècles ?

Si l'énergie de demain sera qualitativement celle d'hier, à bien des titres, la question qui se pose aujourd'hui est clairement celle des quantités, des moyens d'en disposer, et des inconvénients ou des risques que nous sommes prêts à courir pour cela. Passé le seuil de l'indispensable au maintien en vie, quelle est la « bonne »

quantité d'énergie nécessaire à notre espèce, celle en dessous de laquelle nous allons vers le chaos social, parce qu'il est impossible de nous sevrer rapidement de cette drogue moderne, et au-dessus de laquelle nous allons vers le chaos physique, parce que l'entropie aura cru trop vite ? Comment en disposer, dans un monde fini et soumis à de multiples contraintes ? Comment apprécier les effets différés mais probables de l'usage de certaines énergies, comme la rupture d'approvisionnement, le changement climatique ou, dans une bien moindre mesure cependant, le devenir des déchets nucléaires ? Il apparaît désormais aux yeux de plus en plus de physiciens et d'ingénieurs de l'énergie que la prolongation des tendances actuelles nous amènera, après la poursuite d'une phase de croissance pendant une durée inconnue mais probablement courte au regard des temps historiques, à une décroissance structurelle inéluctable dans un monde fini. Pouvons-nous retarder très significativement cette issue ultime ?

C'est autour de ces questions que tourne l'ensemble du présent ouvrage. Les auteurs ont cherché à dresser de multiples états des lieux, à faire la part des choses entre ce qui est peut-être souhaitable, ce qui est seulement possible, et ce qui ne l'est pas. Il est bien sûr impossible de tracer une ligne très nette entre l'exposé des faits et les enseignements que l'on en tire, et certains lecteurs ne manqueront pas de parvenir à des conclusions différentes des auteurs sur la base des mêmes constats.

Ce livre aura pourtant pour ambition de concourir à parvenir à un consensus sur au moins un point : il est urgent de s'interroger et d'agir pour la préparation de notre avenir énergétique, beaucoup plus activement que nous ne le faisons aujourd'hui. Sans énergie abondante et peu chère, rien de ce qui fait notre quotidien aujourd'hui ne peut perdurer, et il faut, beaucoup plus qu'aujourd'hui, que tout citoyen et tout homme politique s'en rende compte. Nous n'avons probablement pas l'éternité pour préparer la transition entre le système énergétique actuel, que bien des physiciens et ingénieurs informés considèrent comme non durable, et un système qui préservera la joie de vivre tout en étant compatible avec les limites connues de notre planète.

Jean-Marc JANCOVICI

PREMIÈRE PARTIE

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

1 - INTRODUCTION

Le projet de ce livre a vu le jour à l'occasion du séminaire Daniel DAUTREPPE qui s'est tenu à Saint-Pierre-de-Chartreuse, en octobre 2000, et dont le titre était *L'énergie au 21^e siècle : techniques, économie, environnement*. Les séminaires Daniel DAUTREPPE sont organisés chaque année par la section grenobloise de la Société Française de Physique. Le choix du thème de l'année 2000 s'est fait dans le cadre d'une action de réflexion et de communication sur les problèmes énergétiques menée dès 1997. Dans une première étape, des réunions dont la durée variait entre une demi-journée et deux jours se sont tenues à Paris, comme en Province. Cette étape fut couronnée par le livre *L'énergie dans le monde : bilan et perspectives*, publié par EDP Sciences et rédigé par les organisateurs de ces débats, J.L. BOBIN, H. NIFENECKER et C. STÉPHAN. Le séminaire Daniel DAUTREPPE a permis d'approfondir la démarche et ce livre a ainsi pu bénéficier des contributions de professeurs qui peuvent être considérés comme étant parmi les meilleurs experts français de leur domaine. Un certain nombre de domaines n'avaient toutefois pas été traités à Saint-Pierre-de-Chartreuse. Quelques auteurs ont accepté d'ajouter leur pierre à la construction initiale. En particulier, les organisateurs de l'école d'été E2PHI, qui s'est tenue à Caen en août 2001, ont accepté qu'un certain nombre de contributions publiées dans le compte rendu de cette école soient intégrées dans le présent ouvrage. L'école E2PHI est organisée annuellement par l'Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), avec le soutien de la SFP et de l'UDP (Union des Physiciens) parmi d'autres partenaires. Elle s'adresse plus particulièrement aux enseignants du secondaire.

La première partie traite de la problématique générale de l'énergie, que ce soit au niveau des concepts (R. BALIAN), de l'utilisation finale (J.M. MARTIN-AMOUROUX) ou des perspectives de consommation (H. NIFENECKER).

La deuxième partie traite de l'interaction entre production¹ d'énergie et climat (J.L. BOBIN et L. LI).

La troisième partie traite des combustibles fossiles. Deux chapitres proposent une vision prospective de ces énergies (B. TISSOT et J. LAHERRÈRE). Le cas du charbon

¹ Nous utilisons ici le terme habituel de production d'énergie alors qu'il serait plus correct, comme montré par R. BALIAN, d'utiliser le terme transformation d'énergie potentielle en énergie utilisable (chaleur ou électricité).

est traité en détail par J. TEISSIÉ et ses co-auteurs car il est relativement mal connu. De même G. DURUP aborde la question cruciale du stockage du gaz. Enfin, les effets sanitaires de l'utilisation des combustibles fossiles est traitée par H. NIFENECKER.

La quatrième partie traite des énergies renouvelables : l'hydraulique (P. BACHER et B. TARDIEU), biomasse (G. CLAUDET) ; géothermie (D. MADET), éolien (H. NIFENECKER et J.M. AGATOR), solaire photovoltaïque (P. JOURDE) et solaire thermodynamique (B. RIVOIRE).

La cinquième partie traite de l'énergie nucléaire : réacteurs à fission (R. BRISSOT), stockage géologique des déchets (H. NIFENECKER), fusion contrôlée (J.L. BOBIN) et effets sanitaires des radiations (R. MASSE).

La sixième partie traite du stockage de l'énergie : piles et accus (J.F. FAUVARQUE), piles à combustible (T. ALLEAU) et hydrogène (T. ALLEAU).

La septième partie discute de l'économie de l'énergie : systèmes de fixation de prix (D. BABUSIAUX), prix et coûts internes (J.M. MARTIN-AMOUROUX) et coûts externes (A. RABL).

D'une façon générale, ce livre évite les développements très techniques. Toutefois, les chapitres sur les éoliennes et l'enfouissement des déchets nucléaires font exception à cette règle. En effet, il nous a paru difficile de trouver dans la littérature un exposé des principes physiques à l'œuvre dans ces deux cas, et donc utile d'en exposer les grandes lignes.

Nous sommes conscients que ce livre est loin d'être exhaustif. En particulier, nous n'avons pas abordé les développements assez récents de la production d'électricité par turbines à gaz, les avantages et les difficultés de la cogénération, l'utilisation du solaire thermique pour le chauffage, les pompes à chaleur, toutes les questions relatives aux réseaux électriques. Nous n'avons pas non plus traité des transports. Il nous a fallu trancher entre la nécessité de ne pas laisser vieillir les premières contributions et le désir d'éditer un ouvrage aussi exhaustif que possible. Nous pensons être arrivés à un compromis raisonnable qui permettra au lecteur de se faire une opinion informée sur la problématique présente et future de l'énergie. Nous espérons qu'il voudra bien excuser les lacunes dont nous sommes conscients.

Jean-Louis BOBIN, Elisabeth HUFFER, Hervé NIFENECKER

Remerciements - *Nous remercions tous les auteurs pour leur patience et leur bonne volonté inépuisable. J. LAHERRÈRE, J.M. MARTIN-AMOUROUX et R. MASSE nous ont constamment soutenus en nous prodiguant leurs conseils et leurs suggestions.*

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.

2.1 Conséquences énergétiques des principes fondamentaux	14
2.2 Comparaisons	29
Annexe - L'élaboration du concept d'énergie	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

parties du système et de leurs interactions mutuelles. Son caractère essentiel est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

L'assimilation du concept d'énergie suppose une longue familiarisation avec ses divers aspects et avec les phénomènes où il intervient. C'est pourquoi son élaboration, au cours des siècles passés, a été longue et tortueuse, comme en témoigne la date tardive à laquelle le mot « énergie » est apparu dans le sens que nous lui connaissons : 1850 en Angleterre, 1875 en France. Les nombreux épisodes de cette histoire sont éclairants : ils exhibent en particulier comment des pratiques d'ingénieurs ont inspiré la science fondamentale, et comment celle-ci a initié en retour de nouvelles percées technologiques. Nous en donnons en annexe un aperçu que pourra consulter le lecteur intéressé.

Dans la première partie, nous rappellerons 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. Nous examinerons dans la seconde partie 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. Nous insisterons sur les valeurs caractéristiques des grandeurs en jeu.

2.1. CONSÉQUENCES ÉNERGÉTIQUES DES PRINCIPES FONDAMENTAUX

Aujourd'hui, on n'attend plus guère de progrès conceptuels suggérés par l'énergétique, mais à l'inverse celle-ci continuera toujours à reposer sur les données scientifiques. Nous passons ici en revue quatre catégories d'idées sur lesquelles s'appuient toutes les applications pratiques de l'énergie : le premier et le deuxième principe, la thermodynamique hors d'équilibre et la classification issue de la microphysique. Comme tous les autres grands principes de la physique, ces acquis de la science fournissent des **contraintes** qui limitent les activités humaines.

2.1.1. PREMIER PRINCIPE

L'**énergie** d'un système **isolé** reste **constante** au cours du temps. Il ne peut se créer ni se détruire d'énergie, et il est impropre de parler comme on le fait couramment de « production » ou de « consommation » d'énergie. Dans tous les cas, il s'agit de **changement de forme**, ou de **transfert** d'un système à un autre.

TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE

La vie courante en offre de nombreux **exemples**. « Consommer » de l'énergie électrique pour faire fonctionner un **téléviseur** signifie la transformer en énergie lumi-

neuse émise par l'écran (en passant par l'énergie cinétique des électrons issus de la cathode), en énergie acoustique diffusée dans l'air ambiant (par l'intermédiaire des énergies cinétique et potentielle de la membrane du haut-parleur) et surtout en chaleur inutile (principalement par effet JOULE).

« Produire » de l'énergie électrique dans une **centrale** hydro-électrique signifie transformer l'énergie potentielle de l'eau du barrage en énergie cinétique de cette eau dans les conduites, puis transférer cette énergie cinétique aux turbines et au rotor des alternateurs, qui en définitive la transforment en énergie électrique ; la viscosité de l'eau, les frottements et l'effet JOULE soustraient de ce flux une faible partie, transformée en chaleur. Dans une centrale thermique, on transforme de l'énergie nucléaire ou chimique en chaleur, puis une partie de celle-ci (30 à 40%) en énergie cinétique, enfin électrique.

De même, dans une **voiture**, l'énergie chimique du carburant est transformée en chaleur, dont une partie est communiquée au véhicule sous forme d'énergie cinétique ; celle-ci se transforme en chaleur en raison des frottements et de la résistance de l'air, de sorte qu'en définitive lors d'un trajet en circuit fermé on a exclusivement transformé de l'énergie chimique en chaleur ! Lorsqu'on allume les phares, une partie de l'énergie mécanique est transformée successivement en énergies électrique, lumineuse et calorifique, de sorte que la consommation d'essence augmente nécessairement.

Enfin, la **biologie** fait intervenir des transformations entre énergies de diverses natures : chimique (aliments, métabolisme), radiative (assimilation chlorophyllienne), calorifique, mécanique (muscles), électrique (influx nerveux).

Parmi les diverses formes d'énergie susceptibles de s'échanger les unes en les autres, il convient de distinguer celles qui sont **emmagasinées** dans la matière de celles qui se manifestent lors d'un transfert d'un sous-système à un autre. A la première catégorie appartiennent l'**énergie interne** d'un fluide, fonction de sa température et de sa pression, l'énergie **chimique** d'un carburant, l'énergie **nucléaire** d'un morceau d'uranium, l'énergie **électrochimique** d'une batterie, l'énergie **potentielle** de l'eau d'un barrage dans le champ de pesanteur ou l'énergie **cinétique** d'un véhicule. La seconde catégorie comprend par exemple la **chaleur** rayonnée par un radiateur, le **travail** échangé entre un piston et le fluide qu'il comprime ou l'énergie **électrique** circulant dans une ligne. La plupart des énergies emmagasinées ne sont accessibles que très indirectement.

Les mesures d'énergie sont aussi elles-mêmes toujours des processus indirects basés sur des échanges ou des transferts (calorimètres, compteurs électriques, bolomètres...).

Les technologies de l'énergie visent à contrôler ses divers processus de transformation, afin de réduire la part des formes d'énergie inutiles face à la forme d'énergie que l'on souhaite en définitive extraire. Le premier principe limite les possibilités, puisque la conservation de l'énergie impose que les **bilans soient équilibrés**.

UNITÉS

Ces bilans ne peuvent être effectués de façon quantitative que si toutes les formes d'énergie sont mesurées avec la même unité. En principe, on ne devrait utiliser que le **joule**, unité légale du système international (SI). L'énergie cinétique d'une masse de 1 kg lancée à la vitesse de 1 m/s vaut 0,5 J. En soulevant de 1 m au-dessus du sol une masse de 1 kg, on lui fournit un travail d'environ 9,8 J.

Dans la pratique, on continue à employer d'autres unités que la tradition a imposées au gré des besoins. Le **kilowattheure** (1 kWh = 3600 kJ) est adapté aux usages domestiques, en particulier à la fourniture d'électricité ; afin de faciliter les comparaisons, le gaz, lui aussi, n'est plus facturé en France en mètre cube, mais en kilowattheure. Il serait souhaitable, pour permettre au public de mieux apprécier le prix de l'essence et le pouvoir énergétique de ses diverses variétés, de facturer également celle-ci non au litre mais au kilowattheure (la combustion de 1 L dégage environ 12 kWh de chaleur).

Les chimistes et physiologistes utilisent encore trop souvent l'ancienne unité de chaleur, la **kilocalorie** (ou Calorie), non-légale, qui est la quantité de chaleur à fournir à 1 kg d'eau pour l'échauffer de 1 K ; sa valeur, 1 kcal = 4185 J = 1,2 Wh, a été mesurée au XIX^e siècle lorsqu'on a établi l'équivalence du travail et de la chaleur.

La microphysique a besoin d'unités d'énergie beaucoup plus petites. L'unité adaptée aux phénomènes de physique atomique ou de physique des solides est l'**électronvolt**, énergie acquise par un électron lorsque son potentiel électrique diminue de 1 V ; la charge d'une mole d'électrons étant de 96 500 C, on trouve en divisant par le nombre d'AVOGADRO $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ que 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J. En physique nucléaire et en physique des particules, on utilise les multiples de 10^3 en 10^3 de l'électronvolt : keV, MeV, GeV, TeV. La mécanique quantique associe **fréquences** et énergies selon la relation $E = h\nu$; un photon au milieu du visible ($\lambda = 0,6 \text{ nm}$) a une fréquence de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, donc une énergie de 2,1 eV. La relation d'EINSTEIN $E = mc^2$ fait correspondre à la **masse** de l'électron une énergie de 0,511 MeV, ou encore à une masse de 1 μg une énergie de 25 kWh.

Enfin, les économistes et les médias ont malheureusement imposé une unité d'énergie scientifiquement aberrante, la **tonne équivalent pétrole** (tep ou toe en américain), ainsi que la tonne équivalent charbon (1 tec = 0,7 tep). Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole, soit 1 tep = 12 MWh ; ce chiffre est approximatif car il dépend de la qualité du pétrole. De plus, les conventions internationales, adoptées par la France en 2002, font intervenir simultanément plusieurs facteurs de conversion pour la traduction en tep des énergies électriques. En ce qui concerne les consommations et les échanges internationaux, la situation est simple : on utilise le facteur ci-dessus, soit 1 MWh = 0,086 tep. Cependant, pour la production d'énergie électrique, on emploie trois facteurs de conversion différents, selon la nature de la source et son rendement. Pour les centrales nucléaires, dont le rendement moyen est de 33%, la production de 1 MWh

d'énergie électrique nécessite le dégagement dans le réacteur d'une quantité de chaleur de 3 MWh ; en notant que cette quantité de chaleur pourrait être fournie en brûlant $3 \times 0,086$ tonnes de pétrole, on comptabilise pour l'électronucléaire $1 \text{ MWh} = 0,26 \text{ tep}$. De même, le rendement moyen des centrales à géothermie étant de 10%, on adopte $1 \text{ MWh} = 0,86 \text{ tep}$ pour l'énergie électrique issue de la géothermie. Mais pour toutes les autres sources d'énergie électrique (hydraulique, éolienne, photovoltaïque), on ne tient pas compte du rendement, de sorte que l'on prend $1 \text{ MWh} = 0,086 \text{ tep}$. L'emploi de ces facteurs de conversion différents, sans compter le fait qu'ils ont changé au cours du temps, nuit à la comparaison entre les diverses formes d'énergie et à la clarté du débat sur les problèmes énergétiques.

En ce qui concerne la **puissance**, ou le **flux d'énergie**, la situation est plus favorable car c'est l'unité légale, le **watt** et ses multiples (kW, MW, GW ou TW) qui est le plus couramment utilisée. Les économistes emploient cependant aussi la tep par an, qui équivaut à 1,4 kW thermique.

2.1.2. DEUXIÈME PRINCIPE

L'entropie thermodynamique est une grandeur additive que l'on peut associer à chaque état voisin de l'équilibre d'un système. Le deuxième principe peut s'énoncer en exprimant que, pour tout processus spontané, l'**entropie** d'un système **isolé** est, dans l'état final, **supérieure** (ou égale) à sa valeur dans l'état initial. A l'échelle microscopique, cette propriété traduit une **augmentation du désordre**. De manière équivalente, elle signifie que l'évolution transfère une information macroscopique sur l'état initial du système vers des degrés de liberté microscopiques inaccessibles, de sorte qu'elle entraîne une **perte d'information**. Ces interprétations sont précisées par l'expression $S = k \ln W$ de l'entropie, qui la relie au nombre W de configurations microscopiques équivalentes en ce qui concerne l'état macroscopique considéré.

Dans le système SI, l'**unité** d'entropie est le **joule par kelvin**, en raison du choix comme unité de température absolue du kelvin, qui est défini en précisant que la température du point triple de l'eau est 273,16 K. La constante de BOLTZMANN k , qui figure dans l'expression microscopique ci-dessus de l'entropie, vaut alors $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$. Il aurait scientifiquement été plus satisfaisant de mesurer les températures en unité d'énergie ; l'entropie aurait alors été une grandeur sans dimension, ce qui est plus conforme à son interprétation microscopique comme mesure du désordre ou du manque d'information. Plus précisément, l'entropie s'identifie à une information manquante si l'on fixe son facteur multiplicatif en la redéfinissant selon $S = \log_2 W$, ce qui fournit $S = 1$ pour l'alternative binaire $W = 2$. Elle se mesure alors en bits, de sorte que le joule par kelvin équivaut à $1,044 \times 10^{23}$ bits ; ce choix d'unité n'est évidemment pas adapté aux objets macroscopiques, dont le désordre à l'échelle microscopique est gigantesque.

L'entropie S d'un matériau dépend de son énergie interne, ainsi que de toutes les autres grandeurs extensives qui caractérisent son état macroscopique. Par exemple, c'est pour un fluide une fonction de l'énergie, du nombre de molécules et du volume. De même que le nombre W de configurations microscopiques, S croît avec l'énergie et avec le volume.

IRRÉVERSIBILITÉ, DISSIPATION D'ENTROPIE ET DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE

Le deuxième principe implique que les processus pouvant survenir dans un système isolé sont en général **irréversibles** : lorsqu'un certain processus est autorisé, le processus inverse est interdit. Comme le premier principe, le deuxième exprime une limitation de ce que permet la nature. Les processus réversibles, pour lesquels l'entropie reste constante au cours du temps, sont des cas limites, autorisés mais exceptionnels en pratique. Le degré d'irréversibilité d'une transformation d'un système isolé peut être caractérisé par la **dissipation**, que nous définissons pour plus de généralité comme l'augmentation de son entropie.

Les transformations où l'énergie change de forme doivent en particulier faire croître l'entropie globale (ou éventuellement la laisser constante). Or, l'effet JOULE convertit intégralement une énergie électrique en chaleur ; les frottements ou la viscosité convertissent intégralement une énergie cinétique en chaleur. De telles transformations d'énergie électrique ou mécanique en énergie interne sont irréversibles et dissipatives : l'entropie augmente lorsque le système reçoit de la chaleur, parce qu'elle est une fonction croissante de l'énergie interne, alors qu'elle ne dépend pratiquement pas des variables électriques ou mécaniques macroscopiques. Pour cette même raison, les conversions entre une forme ou une autre d'énergie électrique ou mécanique sont des phénomènes réversibles (ou presque) : oscillation d'un ressort ou d'un pendule, auquel cas l'énergie cinétique et l'énergie potentielle (élastique ou de gravité) s'échangent, fonctionnement d'un alternateur ou d'un moteur électrique (où l'effet JOULE est faible). De ces observations émerge une nouvelle classification des diverses formes d'énergie. La transformation d'énergie électrique ou mécanique en chaleur apparaît comme une **dégradation**, car à l'inverse une transformation intégrale de chaleur en énergie électrique ou mécanique est impossible. La **chaleur** est une **forme dégradée** d'énergie, les énergies **mécaniques** et l'énergie **électrique** sont des **formes nobles**, équivalentes en ce sens qu'elles peuvent s'échanger de façon réversible.

A l'échelle microscopique, cette distinction traduit un caractère **plus ou moins désordonné** de chaque forme d'énergie. La chaleur s'interprète à cette échelle comme l'énergie cinétique désordonnée, inaccessible à l'observation macroscopique, des particules (molécules pour un fluide, électrons pour un métal). Mais si celles-ci ont un mouvement collectif global, avec une vitesse de dérive d'ensemble qui se superpose aux mouvements désordonnés, isotropes en moyenne, ce mouvement collectif s'observe à notre échelle comme un courant hydrodynamique ou un courant électrique, auquel est associée une énergie ordonnée.

SIXIÈME PARTIE - LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

23 - LA PRODUCTION ET LE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE...	499
<i>Jean-François FAUVARQUE</i>	
23.1. Historique.....	499
23.2. Caractéristiques générales.....	501
23.3. Constitution.....	501
23.4. Force électromotrice.....	503
23.4.1. Capacité.....	504
23.4.2. Puissance.....	505
23.5. Cyclabilité.....	506
23.5.1. Les piles à combustible (0,6 à 0,8 V par élément).....	507
23.5.2. Systèmes rédox.....	508
23.6. Conclusion.....	509
24 - LES PILES À COMBUSTIBLE	511
<i>Thierry ALLEAU</i>	
24.1. Un peu d'histoire.....	511
24.2. Le principe de fonctionnement.....	512
24.3. De la cellule au module.....	514
24.4. Les différents types de piles à combustible.....	514
24.5. L'état d'avancement des filières de piles à combustible.....	516
24.6. Le problème du combustible.....	520
24.7. Les grands domaines d'applications de la pile à combustible.....	521
24.7.1. Le portable.....	521
24.7.2. Le transport.....	522
24.7.3. Le stationnaire.....	525
24.8. La production collective et industrielle.....	526
24.9. La production individuelle.....	527
Références.....	528
25 - LE VECTEUR D'ÉNERGIE « HYDROGÈNE »	529
<i>Thierry ALLEAU & Michel ROSTAING</i>	
25.1. Environnement et ressources énergétiques : deux préoccupations majeures.....	529
25.2. Quelles sont les perspectives de consommations vers 2050 ?.....	530
25.3. Quels vecteurs d'énergie dans l'avenir ?.....	531
25.4. L'hydrogène.....	532
25.4.1. Le marché actuel et les perspectives de production de l'hydrogène.....	533
25.4.2. Quelles perspectives pour le coût de l'hydrogène ?.....	534
25.4.3. Quels sont les freins actuels au développement, en France, de l'hydrogène ?.....	535
25.4.4. Quelles sources d'énergie pour la production d'hydrogène ?.....	536

25.4.5. Quelles solutions pour le transport de l'hydrogène ?	540
25.4.6. Quelles solutions pour le stockage ?	540
25.4.7. Quelle solution pour la distribution de l'hydrogène ?	542
25.4.8. Quelles solutions pour la conversion de l'hydrogène ?	542
25.4.9. Quels domaines d'applications pour l'hydrogène ?	543
25.4.10. Quels risques avec l'hydrogène ?	544
25.4.11. Quelle transition vers l'économie de l'hydrogène ?	545
25.4.12. Quels sont les acteurs de l'hydrogène ?	546
25.5. Conclusions	547
Bibliographie	548

SEPTIÈME PARTIE - L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE

26 - L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	551
<i>Denis BABUSIAUX</i>	
26.1. La demande	551
26.2. L'offre et ses déterminants	553
26.2.1. L'estimation des réserves de pétrole	553
26.2.2. Localisation des réserves et production	554
26.2.3. L'offre de produits raffinés	555
26.2.4. L'offre d'électricité	555
26.3. Les marchés (régionaux) des énergies de réseaux	556
26.3.1. Le gaz naturel aux Etats-Unis	557
26.3.2. L'électricité aux Etats-Unis	557
26.3.3. L'électricité en Europe	557
26.3.4. Le gaz naturel en Europe	558
26.4. Les marchés internationaux	558
26.5. Énergie et environnement	560
26.6. Stratégie des entreprises	561
Bibliographie	562
27 - LES PRIX ET LES COÛTS DES SOURCES D'ÉNERGIE	563
<i>Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX</i>	
27.1. Introduction	563
27.2. D'indispensables définitions	564
27.2.1. Les prix	564
27.2.2. Les coûts	565
27.2.3. Relations entre coûts et prix	567
27.3. Les coûts de production des sources fossiles	569
27.3.1. Pétrole	570
27.3.2. Gaz naturel	572
27.3.3. Charbon minéral	573
27.4. Les coûts de production des carburants	575