

Michel Feidt

CLIMA&CONFORT
Efficacité énergétique & confort intérieur des bâtiments

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Du dimensionnement
des composants au pilotage
des systèmes

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture : © JustContributor – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2014
ISBN 978-2-10-070863-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS

XI

PARTIE 1 INTRODUCTION À L'ÉNERGÉTIQUE

CHAPITRE 1 • LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE	3
1.1 Définition de l'énergétique	3
1.2 État des lieux de la situation énergétique	3
1.3 Principaux usages de l'énergie	7
1.4 Développement durable	9
CHAPITRE 2 • LES PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES	13
2.1 Une abondante littérature	13
2.2 Évolution probable de la demande et de l'offre	13
2.3 Les orientations technologiques	16
2.4 Conclusions	22
CHAPITRE 3 • L'ÉNERGIE	25
3.1 Les formes de l'énergie	25
3.2 La conversion d'énergie	29

3.3	Transfert d'énergie	33
3.4	Stockage et transport d'énergie	35
3.5	Retour sur les usages de l'énergie	37
3.6	Conclusions	38

PARTIE 2

LES OUTILS DE L'ÉNERGÉTIQUE

CHAPITRE 4 • LES BASES THERMODYNAMIQUES : LA THERMOSTATIQUE	43
4.1 Introduction	43
4.2 Notions essentielles de thermostatique	45
4.3 Conclusion	69
CHAPITRE 5 • À LA RENCONTRE DE LA MÉCANIQUE DES FLUIDES ET DE LA THERMOCINÉTIQUE : LE PRINCIPE DE CONSERVATION ÉTENDU	71
5.1 Introduction : extension de la notion de transformation thermodynamique	71
5.2 Conservation de la matière	73
5.3 Conservation de quantités mécaniques	81
5.4 Conservation de l'énergie	84
5.5 Conclusion	90
CHAPITRE 6 • DONNÉES THERMOPHYSIQUES	92
6.1 Retour sur la thermodynamique analytique	92
6.2 Fonctions d'état des fluides réels	95
6.3 Les données thermodynamiques	98
6.4 Disponibilités des données thermophysiques	118
6.5 Quelques exemples de données pour les corps courants	126
6.6 Conclusion	136
CHAPITRE 7 • DÉGRADATIONS D'ÉNERGIE – PRINCIPE D'ÉVOLUTION	137
7.1 Introduction	137
7.2 Équilibre et réversibilité	138
7.3 Transformation réelle et irréversibilité	140
7.4 Efficacité d'une machine ou d'un procédé	147
7.5 Bilans entropiques et exergétiques	152
7.6 Conclusions	156

CHAPITRE 8 • THERMODYNAMIQUE DES PHÉNOMÈNES IRRÉVERSIBLES LINÉARISÉE	158
8.1 Introduction	158
8.2 Les irréversibilités et le flux de création d'entropie	158
8.3 Relations flux-force et entropie créée	166
8.4 Expression des flux en fonction des forces – approximation linéaire	169
8.5 États stationnaires de non-équilibre	172
8.6 Conclusion	176
 CHAPITRE 9 • ÉCONOMIE ET ENVIRONNEMENT	 178
9.1 Introduction : l'analyse de projet	178
9.2 Les bases de l'analyse économique	182
9.3 Thermoéconomie et prolongements	193
9.4 Études de cas sur l'optimisation thermoéconomique	215
 CHAPITRE 10 • MODÈLES ET SIMULATION	 218
10.1 Introduction	218
10.2 Modélisation	221
10.3 Simulation de systèmes et procédés	250
10.4 Quelques logiciels de simulation	255
 CHAPITRE 11 • THÉORIE DE LA VALEUR ET OPTIMISATION	 260
11.1 De la simulation à l'optimisation	260
11.2 Théorie de la valeur ; critère d'optimisation	265
11.3 L'optimisation	283

PARTIE 3

LES APPLICATIONS DE L'ÉNERGÉTIQUE

CHAPITRE 12 • ISOLATION – CONDUCTION	331
12.1 Introduction	331
12.2 Les bases du modèle de conduction thermique	334
12.3 Les mécanismes de la conduction : notions et conséquences	351
12.4 Des applications de la conduction	359
12.5 Étude de cas sur régime dynamique stationnaire d'un barreau en fission	371
12.6 Études de cas sur l'isolation thermique	373

CHAPITRE 13 • TRANSFERTS CONVectifs – ÉCHANGEURS DE CHALEUR	381
13.1 Introduction aux transferts couplés (chaleur-matière)	381
13.2 Convection et transferts	382
13.3 Échangeurs de chaleur	412
13.4 Échangeurs de chaleur latente	428
13.5 Optimisation d'échangeurs de chaleur	450
13.6 Études de cas sur les échangeurs de chaleur	465
13.7 Conclusion générale	469
 CHAPITRE 14 • TRANSFERTS DE MATIÈRE (ET MACHINES)	472
14.1 Mécanique des fluides et transfert de matière	472
14.2 Turbomachines	480
14.3 Compression-détente	514
14.4 Physique du vide	527
14.5 Étude de cas sur l'optimisation d'un tube de Ranque	545
14.6 Conclusion	551
 CHAPITRE 15 • MACHINES À CYCLES INVERSES	553
15.1 De la production de froid à la revalorisation de la chaleur	553
15.2 Les machines à compression mécanique de vapeur	567
15.3 Les machines thermiques	601
15.4 Autres machines	610
15.5 Très basses températures (TBT), la cryogénie	616
15.6 Conclusions	634
 CHAPITRE 16 • COMBUSTION ET MOTEURS À COMBUSTION	637
16.1 Combustion et combustibles	637
16.2 Chaudières et fours	663
16.3 Moteurs à combustion interne alternatifs	668
16.4 Autres moteurs	696
 CHAPITRE 17 • LA VAPEUR D'EAU	721
17.1 Introduction	721
17.2 Production et utilisation de la vapeur d'eau	721
17.3 L'air humide	742
17.4 Études de cas sur la vapeur d'eau et l'air humide	760

CHAPITRE 18 • CONVERSION ET STOCKAGE D'ÉNERGIE	768
18.1 Introduction	768
18.2 Énergie nucléaire	769
18.3 L'énergie solaire thermique	809
18.4 Autres conversions d'énergie	832
18.5 Stockage d'énergie	851
18.6 Conclusion	860
 CHAPITRE 19 • L'INTÉGRATION DE SYSTÈMES ET PROCÉDÉS	 861
19.1 Introduction	861
19.2 La cogénération	862
19.3 Intégration des systèmes et procédés énergétiques	872
19.4 Intégration et environnement	888
19.5 Conclusion	897
 ANNEXE	
 ANNEXE 1 • MÉCANIQUE GÉNÉRALE	 899
A.I.1 Introduction	899
A.I.2 Cinématique du solide	899
A.I.3 Cinétique	901
 ANNEXE 2 • MATHÉMATIQUE – TRANSFORMATION DE LEGENDRE	 903
A.II.1 Expression des équations de Navier-Stokes en systèmes de coordonnées cartésien, cylindrique, sphérique	903
A.II.2 Facteur intégrant	905
A.II.3 Transformation de Legendre	908
 ANNEXE 3 • MÉCANIQUE DES FLUIDES	 911
 ANNEXE 4 • DONNÉES THERMOPHYSIQUES	 913
 INDEX	 923

Avant-propos

Le présent ouvrage a pour objectif d'être une référence dans le domaine de l'énergétique, qui constitue un domaine clé pour l'avenir du monde. Cela se manifeste non seulement dans les diverses crises que nous avons connues durant les trente dernières années, mais aussi par la contrainte de protection de l'environnement de plus en plus forte.

L'approche proposée s'appuie avant tout sur la physique (thermodynamique) et les sciences pour l'ingénieur ; toutefois les aspects scientifiques et techniques sont prolongés par des aspects technologiques et surtout économiques, que l'ingénieur ne peut ignorer. L'écoconception et le développement durable sont abordés.

D'un point de vue fondamental, un prolongement des connaissances actuelles de thermodynamique vers une « thermodynamique optimale généralisée » est abordé ; cette conjecture suppose une relation forte entre le principe d'évolution (second principe de la thermodynamique), et l'optimisation adaptative rencontrée dans la Nature qui nous entoure, et que l'ingénieur cherche à reproduire dans ses réalisations.

L'ouvrage comporte trois parties. La première partie situe la problématique de l'énergie, son passé, ses perspectives et les concepts essentiels. La deuxième partie est centrée sur les outils de l'énergétique ; la thermodynamique, pluridisciplinaire par essence, y occupe une place centrale. Les couplages avec d'autres sciences (mécanique, chimie) y sont mis en exergue (toute forme d'énergie avec la chaleur : couplage thermoénergétique) mais plus particulièrement, vu son importance, le couplage thermomécanique. L'outil mathématique d'optimisation est largement développé aussi, puisqu'il permet d'aller de l'optimisation de conception à la gestion de systèmes instationnaires. La troisième partie traite de l'ensemble des

applications de l'énergétique ; elle sera utile aux praticiens, ingénieurs et techniciens du domaine de l'énergie-environnement.

Sont privilégiés :

- l'aspect méthodologique en insistant sur les modélisations globales ou filaires pour les systèmes thermomécaniques (les extensions 3 D et aux autres systèmes sont sans difficulté de principe) ;
- l'approche thermodynamique en dimensions finies, chère à l'auteur, montrant l'importance des échelles spatiales et temporelles entre autres ; l'analyse entropique ou exergétique sont développées.

De nombreux exemples sont relatifs aux échangeurs de chaleur dans les systèmes et procédés énergétiques, tout simplement parce que la thématique optimisation d'échangeurs en système est celle des travaux effectués dans le groupe de recherche, dont l'auteur est responsable.

Le public étudiant qui reçoit les enseignements correspondants est large : il va de la troisième année d'Université (L3) à la cinquième année (M2) ; les formations correspondantes sont tant professionnalisantes qu'orientées vers la recherche. Le livre résulte de l'expérience de l'auteur sur le site de Nancy (IUT, faculté des sciences, écoles d'ingénieurs) mais aussi hors de France (Belgique, Espagne, Roumanie, États-Unis), et lors de contacts industriels nombreux.

Sans les nombreux contacts de l'auteur, ce livre n'aurait pas cette ampleur. Que tous ceux qui s'y reconnaîtront un peu en soient remerciés ; l'appartenance au CNRS (Programme Énergie), à la SFT (Société Française des Thermiciens), mais aussi à l'IIF (Institut International du Froid, section E2) ou à des réseaux européens dont le réseau EURECO (ADEME), ont aussi grandement contribué à cet enrichissement. Mes remerciements vont aussi à l'éditeur pour sa confiance et sa patience, à M. Schwartz pour son travail de transcription du manuscrit.

Malgré tout le soin apporté à cet ouvrage, il subsiste encore des imperfections de forme et de fond. L'auteur est reconnaissant par avance aux lecteurs, des remarques et suggestions qui ne manqueront pas de venir à son attention.

Sur la période de gestation de ce livre, une personne qui m'est chère est disparue, mais il lui est dédié car, sans elle, il ne serait pas. À ma mère.

PARTIE 1

INTRODUCTION À L'ÉNERGÉTIQUE

Chapitre 1

Le contexte énergétique

1.1 DÉFINITION DE L'ÉNERGÉTIQUE

D'après la définition du *Petit Robert*, l'énergétique est la science traitant des diverses manifestations de l'énergie.

Ce nom, qui peut être aussi un adjectif, n'est pas très connu du public, du fait de sa connotation théorique. Si l'adjectif l'est davantage (aliments énergétiques, par exemple), le mot énergie, lui, est très connu, vu l'usage quotidien que tout un chacun en fait. Ce mot d'origine grecque signifie « force en action ». Nous y reviendrons dans ce livre et montrerons les relations fortes existant entre énergie, environnement et économie, mais aussi d'autres relations plus scientifiques avec entropie et énergie.

Pour paraphraser un livre récemment paru (Arthus-Bertrand Y.), nous disposons d'environ 930 pages pour réfléchir à la problématique énergétique actuelle, sachant que l'énergie est, avec l'eau et la sécurité, un des trois problèmes majeurs du moment. On rappellera à cette occasion la notion de développement durable, telle qu'elle est donnée dans le rapport de G.H. Brundtland, qui a défini cette notion en 1987 : « répondre aux besoins du présent sans compromettre (ou au minimum maintenir) la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

1.2 ÉTAT DES LIEUX DE LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE

1.2.1 Quelques remarques générales

La population mondiale était de 2,5 milliards d'habitants en 1950 et de 6,2 milliards en 2002. L'estimation pour 2050 est dans une fourchette de 8 à 9 milliards (environ 50 % de plus qu'en 2000). Malgré le ralentissement, cette croissance génère des besoins.

Les sources d'énergie dans le monde sont actuellement le pétrole (34,9 %), le charbon (23,5 %), le gaz (21,1 %), le nucléaire (6,8 %), puis les énergies renouvelables (13,8 %, dont 10,7 % pour la biomasse) : la dépendance aux énergies fossiles, donc épuisables, est flagrante.

À cela s'ajoute un couplage avec l'évolution de l'environnement qui représente un enjeu mondial, du fait des changements climatiques annoncés. Le couplage entre le réchauffement planétaire, le peuplement et les émissions de gaz à effet de serre n'est un secret pour personne. Même si selon les scénarios l'augmentation du CO₂ atmosphérique peut passer de 370 ppm (partie par million) aujourd'hui à 550 ppm, voire 1 100 ppm en 2100, cela se traduira par un réchauffement atmosphérique de + 2 à + 6 °C à la même date. Cela ne sera pas sans conséquence, dont un bouleversement de la biodiversité.

1.2.2 Quelques chiffres sur la situation énergétique actuelle

a) Importance reconnue de la place de l'énergie

Un débat national sur les énergies a eu lieu en France au premier semestre 2003 (MEFI 1). Le document correspondant, à l'initiative du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie centrait le débat sur les énergies en relation avec l'environnement, la qualité de vie, le développement durable.

Ce débat a été relayé par un bilan publié dans les *Cahiers de l'industrie* (Industries) ; des contacts utiles figurent dans le même document (p. 21). Le débat se poursuit depuis.

Parmi les publications du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, on notera l'édition 2004 des données et chiffres clés sur les bilans de l'énergie en France (MEFI 2), très détaillée ; les chiffres en bref figurent dans la référence (MEFI 3). Des compléments d'information peuvent être obtenus sur le site www.industrie.gouv.fr/industrie. Enfin, la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) édite une lettre d'information trimestrielle gratuite.

b) Une unité hors Système international

La « tep », tonne équivalent pétrole, est l'unité couramment utilisée dans les documents statistiques.

Définition : la tep est la quantité de combustible pétrole qui fournit la même quantité de chaleur par combustion.

On note que cette définition manque de rigueur scientifique, si elle est commode d'usage : l'arbitraire provient essentiellement de la qualité du combustible.

- 1 tep est équivalent à (≈) 11 630 kWh (unité hors système) ;
- 1 Mtep représente 1 million de tep ;
- 1 tonne de charbon ≈ 0,6 tep ;
- 1 tonne de bois ≈ 0,3 tep.

Pour les unités du Système international, on se reportera à l'annexe en fin de chapitre.

c) Quelques chiffres dans le monde, en Europe, en France

Le tableau 1.1 (DGEMP) rend compte des données de 2002. Y figurent la population, la consommation totale d'énergie primaire, d'électricité, de pétrole dans les transports et les émissions de CO₂.

La lecture de ce tableau est complétée par le tableau 1.2. Il apparaît alors des spécificités flagrantes indiquées ci-après :

- l'énergie primaire dominante dans le monde, ainsi qu'aux États-Unis et en Europe est le pétrole ;
- la France utilise majoritairement l'énergie nucléaire ;
- la Russie utilise majoritairement le gaz naturel ;
- la Chine utilise majoritairement le charbon.

Les situations sont donc très diverses : les 29 pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique) consomment 5 500 Mtep en énergie primaire, alors que le reste du monde en utilise 4 600. Les consommations par habitant et par an sont très disparates :

États-Unis	8,1 tep	Chine	0,9 tep
France	4,3 tep	Afrique	0,6 tep
Allemagne	4,2 tep	Monde	1,7 tep

En France, en 1973, 75 % de l'énergie était importée ; en 2001, ce pourcentage est tombé à 50 % (voir tableau 1.1).

La production d'électricité est essentiellement assurée par EDF, malgré la libéralisation récente du marché (EDF-GDF, et site www.edf.fr). La production se répartit comme indiqué ci-dessous :

- électricité nucléaire 85,7 %
- électricité hydraulique 9,3 %
- charbon 3,3 %
- fioul 1,3 %
- gaz 0,3 %
- renouvelable biomasse 0,1 %

L'électricité achetée se répartit de façon suivante :

- thermique 65,4 %, dont 43,4 % gaz
21,9 % charbon
0,1 % fioul
- renouvelable 28,4 %, dont 24,3 % hydraulique
2,6 % biomasse
1,1 % éolien
0,4 % autres
- nucléaire 0,2 %

Il reste 6 % non identifiés.

TABLEAU 1.1 Données annuelles 2002 de la situation énergétique (DGEMP)

Données annuelles 2002	France	UE (25)	États-Unis	Russie	Chine	Reste du monde	Monde
Population (millions d'habitants)	61	455	287	144	1 287	4 021	6 196
PIB (milliards de dollars US 1995 ppa)	1 453	9 556	9 196	1 039	5 359	18 264	43 413
PIB par habitant (milliers de dollars US 1996 ppa)	23,7	21,0	32,0	7,2	4,2	4,5	7,0
Consommation totale d'énergie primaire (Mtep)	266	1 692	2 290	618	1 245	4 385	10 231
Consommation d'énergie primaire par hab. (tep)	4,3	3,7	8,0	4,3	1,0	1,1	1,7
Consommation d'énergie primaire par unité de PIB ppa (tep/1 000 US\$ 95 ppa)	183	177	249	595	232	240	236
Consommation totale d'électricité (TWh)	451	2 848	3 802	771	1 554	5 726	14 701
Consommation d'électricité par habitant (MWh)	7,4	6,3	13,2	5,3	1,2	1,4	2,4
Consommation d'électricité par unité de PIB ppa (kWh/1 000 US\$ 95 ppa)	310	298	413	742	290	314	339
Consommation de pétrole pour les transports (Mtep)	52	339	605	50	80	673	1 746
Consommation de pétrole pour les transports par habitant (tep)	0,84	0,74	2,1	0,35	0,06	0,17	0,28
Émissions totales de CO ₂ dues à l'énergie (MtC)	103	1 024	1 542	410	902	2 695	6 573
Émissions totales de CO ₂ dues à l'énergie par habitant (tC)	1,7	2,2	5,4	2,8	0,7	0,7	1,1
Émissions totales de CO ₂ dues à l'énergie par unité de PIB ppa (kgC/1 000 US\$ 95 ppa)	71	107	168	395	168	148	151
Taux d'indépendance énergétique	50,6 %	53,4 %	72,8 %	167,4 %	98,1 %	125,0 %	100,7 %

ppa : parité de pouvoir d'achat

TABLEAU 1.2 CONSOMMATION EN ÉNERGIE PRIMAIRE (2002)

%	France	UE	Russie	États-Unis	Chine	Monde
Charbon	5	18	17	24	57	23
Pétrole	34	38	21	40	20	36
Gaz naturel	14	23	53	23	3	21
Électricité nucléaire	41	15	6	9	1	7
Électricité hydraulique	2	2	2	1	2	2
Autres énergies (renouvelables)	5	4	1	3	17	11
TOTAL Mtep	266	1 692	618	2 290	1 245	10 231

1.3 PRINCIPAUX USAGES DE L'ÉNERGIE

1.3.1 Trois usages essentiels

L'énergie est utilisée pour trois usages principaux :

- dans l'habitat ;
- dans les transports ;
- dans l'industrie.

Dans le cas particulier de la France, des efforts d'utilisation rationnelle de l'énergie ont été faits depuis 1973, sous l'impulsion coordonnée de ce qui est devenue l'ADEME (Agence de l'environnement et maîtrise de l'énergie).

Ainsi, dans le domaine de l'habitat, les normes de construction, isolation, ventilation ont fortement évoluées. La consommation dans l'habitat représente environ 1/3 de la facture énergétique.

Les transports, malgré des progrès, ont vu par contre leur part passer de 19,7 % en 1973, à 31,8 % en 2001. On peut noter à cette occasion la hiérarchie des transports :

- automobile : 4,5 ;
- avion : 4,2 ;
- autobus : 2,1 ;
- train, RER : 1,5 ;
- TGV : référence.

Remarque : On peut se poser la question de ce même coefficient pour le vélo ou la marche à pied.

Dans l'industrie, un effort conséquent d'économie a déjà été accompli.

1.3.2 Conséquences de ces usages

a) Les gaz à effet de serre (GES)

Au-delà des usages de l'énergie, la prise de conscience du réchauffement planétaire (1967) a abouti récemment (1997) au protocole de Kyoto, qui vient d'entrer en vigueur en 2005, pour échéance en 2012. On rappellera à cette occasion que l'effet de serre a été découvert en 1827 par Joseph Fourier et que Svante Arrhenius, en 1895, a établi le lien entre la hausse de concentration en gaz carbonique (CO_2) atmosphérique et l'effet de serre correspondant. En fait, d'autres gaz participent à ce même effet : vapeur d'eau, méthane (CH_4), oxyde d'azote (NO_x) principalement.

Depuis 1850 (début de l'ère industrielle), la concentration en CO_2 a augmenté de 30 %, celle de CH_4 a été multipliée par 2.

b) Changement climatique ou choc climatique

Sans gaz à effet de serre, la température atmosphérique serait de -15°C . La température ambiante a été « stable » sur une période de 10 000 ans environ, telle que nous la connaissons. Puis sont apparus récemment des perturbations (inondations, sécheresse, ouragans, fonte de glace, trou dans la couche d'ozone). Autant d'alertes qui vont jusqu'à la disparition possible du Gulf Stream.

Si cela paraît excessif, il n'en reste pas moins que la durée de vie des GES est d'environ 100 ans, pour une diffusion atmosphérique de quelques mois : le problème est donc un problème mondial, malgré et avec ses disparités.

À titre d'exemple, les émissions en kilogramme de CO_2 par habitant et par an en 2000 étaient de :

États-Unis	6 718	Mexique	1 000
Allemagne	3 292	France	2 545

une des plus faibles émissions mondiale s'établissant à 411.

Par rapport aux diverses énergies standard les émissions de CO_2 en g/kWh sont les suivantes :

charbon	800-1 050	hydraulique	4
gaz	430	photovoltaïque	60-450
biomasse	1 500	éolien	3-22
nucléaire	6		

Ces chiffres sont encore en discussion ; ils représentent des ordres de grandeur.

Remarque : Le chiffre donné pour le gaz est relatif à une centrale à cycle combiné. Celui sur la biomasse peut s'annuler en cas de replantation.

Selon une récente information, le chiffre de l'hydraulique pourrait être plus élevé, vu ses conséquences sur l'environnement en début d'exploitation.

1.4 DÉVELOPPEMENT DURABLE

1.4.1 La contrainte environnementale

Comme on vient de le voir, la problématique actuelle liée aux usages d'énergie est de satisfaire aux besoins, sans risque pour la santé, en préservant les ressources naturelles et en protégeant l'environnement.

La tendance actuelle est aux Écobilans ou à l'analyse de cycle de vie (ACV) ; la prise en compte de coûts environnementaux et sociaux se fait plus pressante.

La prise en considération de nombreux polluants est de plus en plus fréquente : fluides frigorigènes (chlore), oxyde de soufre (SO_2), particules, déchets nucléaires, métaux lourds, composés organiques volatils (COV).

La pollution sonore (avions), thermique (eau), voir olfactive apparaissent aussi.

1.4.2 Projet ou rupture de civilisation

À l'augmentation constante des flux, dont les flux de matière et d'énergie, qui vise essentiellement le court terme par l'intermédiaire d'une richesse liée à la quantité (le thermodynamicien dirait l'extensité), l'alternative peut être de privilégier la durée et la qualité des services rendus (le thermodynamicien considère alors le temps et l'intensité).

L'énergétique et la thermodynamique sont des outils permettant l'analyse des progrès « techniques » : ceux-ci sont-ils toujours liés à une course à la vitesse ou à la puissance ?

Le présent livre se propose d'aider à cette réflexion sous forme au moins scientifique, sans pour autant négliger les autres aspects.

BIBLIOGRAPHIE

ARTHUS-BERTRAND Y., *365 jours pour réfléchir à notre terre*. Paris, Éditions de la Martinière, 2004.

DGEMP, *Énergies et matières premières*, Lettre n° 25, décembre 2004.

EDF – GDF, *Lettre d'information*, novembre 2004, avril 2005.

MEFI 1, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, *Énergie, Comprendre pour choisir*. www.debat-energie.gouv.fr, 2003.

Industries, Bilan – Pratique, n° 85, p. 19 et 21, avril 2003.

MEFI 2, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, *Les bilans de l'énergie 1970–2003, données et chiffres clés*, Paris, Éditions de l'Industrie, 2004.

MEFI 3, Ministère de l'économie, des finances et de l'Industrie, *L'énergie en France, chiffres clés et repères*, 2004.

Science et Vie, « Effet de serre, Kyoto enfin sur les rails », février 2005, p. 86-91.

DÉFINITION DES UNITÉS DU SYSTÈME INTERNATIONAL

Unités de base

Le Système international d'unités est fondé sur les sept unités suivantes, appelées unité de base :

Nom	Symbole	Définition
mètre	m	Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde, dans le vide, du rayonnement correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton-86.
kilogramme	kg	Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.
seconde	s	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium-133.
ampère	A	L'ampère est le courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.
kelvin	K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ; le point triple de l'eau est la température d'équilibre (0,01 °C ; 273,16 K) entre la glace pure, l'eau exempte d'air et de vapeur d'eau.
mole	mol	La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone-12. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, d'autres particules ou des groupements spécifiés de ces particules.
candela	cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

Unités dérivées

Les unités dérivées sont des unités qui sont exprimées algébriquement en fonction des unités de base. Certaines d'entre elles portent des noms spéciaux :

Nom	Symbole	Définition
radian	rd	Le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon.
stéradian	sr	Le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe, sur la surface de cette sphère, une aire égale à celle d'un carré dont la longueur des côtés est égale au rayon de la sphère.
newton	N	Le newton est la force qui communique à un corps ayant une masse d'1 kilogramme, l'accélération d'1 mètre par seconde carré.
pascal	Pa	Le pascal est la pression (ou contrainte) produite par une force d'un newton appliquée à une surface d'1 mètre carré.
joule	J	Le joule est le travail effectué lorsque le point d'application d'une force d'1 newton se déplace d'une distance égale à 1 mètre dans la direction de la force.
watt	W	Le watt est la puissance qui donne lieu à une production d'énergie égale à 1 joule par seconde.
hertz	Hz	Le hertz est la fréquence d'un phénomène périodique dont la période est d'1 seconde.
coulomb	C	Le coulomb est la quantité d'électricité transportée en une seconde par un courant d'un ampère.
volt	V	Le volt est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un conducteur parcouru par un courant constant d'1 ampère lorsque la puissance dissipée entre ces points est égale à 1 watt.
farad	F	Le farad est la capacité d'un condensateur électrique entre les armatures duquel apparaît une différence de potentiel d'1 volt lorsqu'il est chargé d'une quantité d'électricité égale à 1 coulomb.
henry	H	Le henry est l'inductance électrique d'un circuit fermé dans lequel une force électromotrice d'1 volt est produite lorsque le courant électrique qui parcourt le circuit varie uniformément à raison d'1 ampère par seconde.
ohm	Ω	L'ohm est la résistance électrique qui existe entre deux points d'un conducteur lorsqu'une différence de potentiel constante d'1 volt, appliquée entre ces deux points, produit dans ce conducteur un courant d'1 ampère, le dit conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.
siemens	S	Le siemens est la conductance électrique qui existe entre deux points d'un conducteur lorsqu'un courant constant d'1 ampère passant dans ce conducteur produit une différence de potentiel d'1 volt entre ces deux points, le dit conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.
weber	Wb	Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produit une force électromotrice d'1 volt si on l'amène à zéro en 1 seconde, par décroissance uniforme.

Nom	Symbole	Définition
tesla	T	Le tesla est l'induction magnétique équivalent à 1 weber par mètre carré.
lumen	lm	Le lumen est le flux lumineux émis dans l'angle solide d'un stéradian par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité d'1 candela.
lux	lx	Le lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'1 lumen par mètre carré.
becquerel	Bq	Le becquerel est l'activité des radionucléides égale à 1 par seconde.
gray	Gy	Le gray est la dose absorbée égale à 1 joule par kilogramme.
degré Celsius	°C	Le degré Celsius a le même ordre de grandeur que le kelvin. La température Celsius se définit comme suit : $T = T - T_0$ où T = température mesurée en kelvin et $T_0 = 273,15$ K
sievert	Sv	Le sievert est l'équivalent de dose, dans le domaine de la radioprotection, égal à 1 joule par kilogramme.

NOUVELLES RÈGLES DE COMPATIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

Le tableau ci-après précise la notion de tep (tonne équivalent pétrole) abordée dans ce chapitre. Elle est conforme aux normes actuellement en vigueur.

Energie	Unité physique	en gigajoules (GJ) (PCI)	en tep (PCI)
Charbon			
Houille	1 t	26	$26/42 = 0,619$
Coke de houille	1 t	28	$28/42 = 0,667$
Agglomérés et briquettes de lignite	1 t	32	$32/42 = 0,762$
Lignite et produits de récupération	1 t	17	$17/42 = 0,405$
Pétrole brut et produits pétroliers			
Pétrole brut, gazole/fioul domestique, produits à usage non énergétique	1 t	42	1
GPL	1 t	46	$46/42 = 1,095$
Essence moteur et carburacteur	1 t	44	$44/42 = 1,048$
Fioul lourd	1 t	40	$40/42 = 0,952$
Coke de pétrole	1 t	32	$32/42 = 0,762$
Électricité			
Production d'origine nucléaire	1 MWh	3,6	$\frac{0,086}{0,33} = 0,26$
Production d'origine géothermique	1 MWh	3,6	$0,086/0,1 = 0,86$
Autres types de production, échanges avec l'étranger, consommation	1 MWh	3,6	$3,6/42 = 0,086$
Bois	1 stère	6,17	$6,17/42 = 0,147$
Gaz naturel et industriel	1 MWh PCS	3,24	$3,24/42 = 0,077$

Chapitre 2

Les perspectives énergétiques

2.1 UNE ABONDANTE LITTÉRATURE

La prospective du domaine énergétique préoccupe de nombreux organismes depuis les chocs pétroliers de 1973 et 1979 (craintes de pénurie et menaces sur l'environnement planétaire). Ainsi l'AIE (Agence internationale de l'énergie) réalise des projections des marchés et des prix ; le Congrès mondial de l'énergie quant à lui se préoccupe davantage de l'évolution de la demande et des orientations technologiques.

On dispose ainsi à des horizons de 10 à 50 ans de scénarios sur la base d'évolutions technologiques, économiques et sociales ; un exemple de développement peut être trouvé dans l'ouvrage de J.-M. Martin.

D'un point de vue plus fondamental, le CNRS, Centre national de la recherche scientifique, développe en France un programme « Énergie » (CNRS focus : <http://www.imp.cnrs.fr/energie>). Les étudiants de 5^e année de cycles universitaires reçoivent aussi couramment des enseignements dans ce domaine (DESS-EMI, devenu mastère MEPI, puis MEPP).

2.2 ÉVOLUTION PROBABLE DE LA DEMANDE ET DE L'OFFRE

2.2.1 Demande en énergie

La consultation de la littérature met en avant :

- une croissance de la demande en électricité ;
- une demande soutenue dans le domaine des carburants.

La croissance de la demande en électricité est principalement liée à la démographie. Dans le domaine des transports, il y a un effet modérateur lié à l'efficacité énergétique correspondante : on notera à cet effet l'existence en France du Programme pour la recherche, le développement et l'innovation dans les transports terrestres (Prédit), consacré aux transports (<http://www.predit.prd.fr>).

2.2.2 L'offre en énergie

Elle est fortement dépendante de contraintes de capacités des ressources et aussi du potentiel d'économie d'énergie. Par ailleurs le facteur prix des sources d'énergie est important, même s'il est très « fluctuant » et si une tendance reste difficile à discerner. De ce fait le problème à résoudre paraît plus économique ou institutionnel que technique.

a) Les tendances à moyen terme (10 ans)

La suprématie des énergies fossiles perdure : pétrole 40 %, charbon 30 %, gaz naturel 20 %, autres 10 %.

La production d'électricité se fera :

- à partir du charbon 40 %
- à partir du gaz 15 % (en augmentation)
- à partir du nucléaire 15 % (stable)
- à partir de l'hydraulique 20 % (stable)
- à partir du pétrole 10 % (en diminution)

b) Les tendances à long terme (2020-2050)

La figure 2.1 confirme le déclin prévu du pétrole, l'importance du nucléaire et des énergies renouvelables, et sans doute, l'émergence de la biomasse tant traditionnelle que nouvelle (biocarburants par exemple).

c) Les réserves

Les estimations des réserves sont graduées en réserves prouvées, récupérables et ultimes (tableau 2.1), avec parfois des fourchettes, selon l'estimation.

TABLEAU 2.1 ESTIMATIONS DES RÉSERVES EN GTEP

Énergie	Prouvée	Récupérable	Ultime
Pétrole	150 – 193 (50 ans)	145 – 332	1 900
Gaz naturel	141 – 192 (80 ans)	258 – 279	400
Hydrates			18 700
Charbon	606 (275 ans)	2 794	3 000
Total	1 282	3 804	24 000

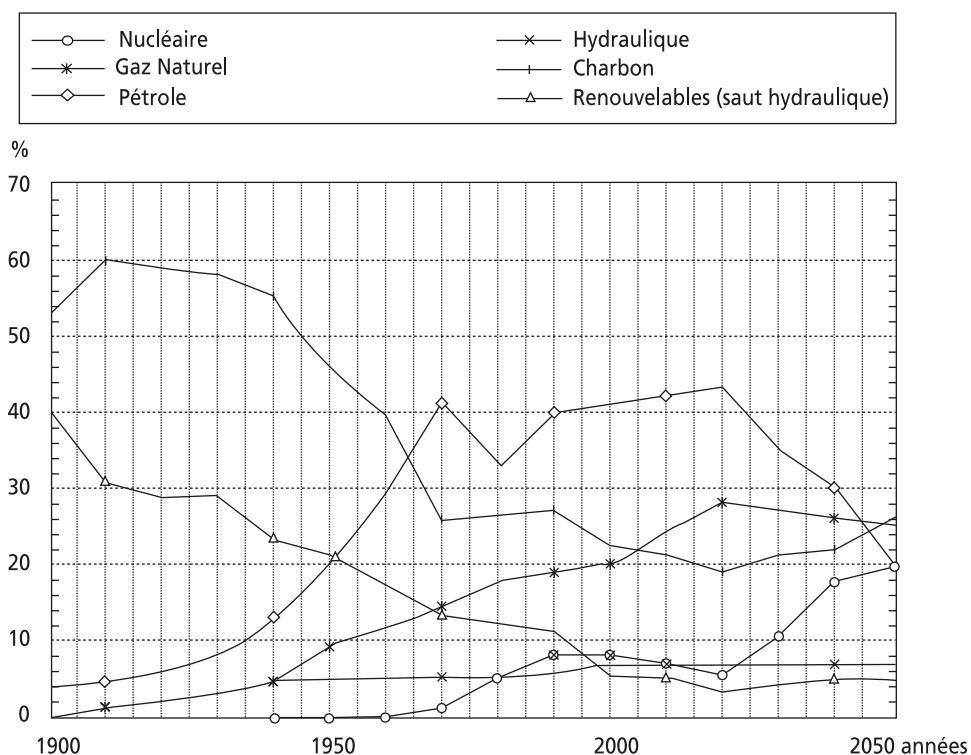


Figure 2.1 Évolution possible des contributions relatives des diverses sources d'énergie (source : Total)

Il ressort de ce tableau que l'utilisation du pétrole en augmentation dans les transports a des réserves limitées à 50 ans. Le GN (gaz naturel) voit sa consommation augmenter dans l'habitat, avec des réserves estimées à 65 ans en 2002. Le charbon, à l'origine de la révolution industrielle au XIX^e siècle, possède la plus grande longévité d'usage, vu ses réserves (260 ans, base 2002).

On remarque que les chiffres sont susceptibles de variations significatives selon les sources et doivent donc être relativisés. D'autre part la production d'énergie à partir des hydrates reste actuellement controversée.

L'énergie nucléaire reste un cas atypique d'énergie fossile ; les réserves prouvées varieraient entre 57 et 3 390 Gtep, les réserves ultimes entre 410 et 21 050 Gtep ; donc la limite actuelle de cette énergie serait à terme de 40 ans. La France qui génère l'essentiel de son électricité à partir de cette énergie, produit 1 kg de déchet par an et par habitant (dont 50 g à haute activité et longue durée de vie).

Les énergies renouvelables sont des énergies de type flux. De ce fait les estimations sont rapportées en Gtep/an. Le tableau 2.2 donne des estimations pour le monde.

TABLEAU 2.2 ÉNERGIES RENOUVELABLES EN GTEP/AN

Hydraulique	Biomasse	Solaire	Éolien	Géothermie	Océan
0,9	2	100 000	8	15	2

Il y a lieu de remarquer ici que ces chiffres sont fortement dépendants des technologies. Pour les coûts selon les filières on pourra se reporter à MEFI3.

La France possède un bon potentiel hydraulique (en particulier sur la micro-hydraulique), de même en géothermie (expérimentation de Soultz). Le gisement éolien est le deuxième d'Europe. Il se développe actuellement en Roussillon, dans le Nord, en Charente et en Vendée. La biomasse est aussi bien représentée, puisque la forêt française est la troisième forêt d'Europe (après la Suède et la Finlande), mais les 14 millions d'hectares sont très morcelés. Par contre la biodiversité est bonne (une dizaine d'essences). On remarquera que le bois comme le pétrole n'est pas seulement combustible. Les 500 000 emplois liés au bois (essentiellement en PME) produisent :

- du bois d'œuvre 61,4 %
- du bois industriel : papier et panneau 31,1 % ; bois du feu 7,5 %
- et des déchets qui restent souvent à valoriser.

d) *Le bouquet énergétique*

De l'ensemble des considérations précédentes, il ressort la nécessité d'utiliser aux mieux toutes les formes d'énergie dont nous disposons, pour satisfaire à nos besoins essentiels. Ce livre a pour objet de fournir des outils en ce sens, sachant que l'industrie de l'énergie représente aujourd'hui :

- 3 % du PIB (produit intérieur brut), soit 600 € par habitant ;
- 26 % des investissements industriels ;
- 230 emplois (1 % de la population active).

2.3 LES ORIENTATIONS TECHNOLOGIQUES

2.3.1 Nécessité des progrès technologiques

Les pages précédentes ont illustré la forte corrélation existant entre le développement économique et la consommation en énergie ; il est même apparu que les freins semblaient davantage économiques, financiers ou institutionnels que techniques. Il n'en reste pas moins que l'on doit se poser les questions suivantes : les besoins énergétiques du futur sont-ils, sans apport d'énergie fossile :

- scientifiquement possibles ;
- techniquement faisables ;
- économiquement acceptables, voire rentables ;
- écologiquement (et humainement) acceptables ?

L'ordre ici n'est pas quelconque et montre que les aspects scientifiques et techniques ont un rôle important à jouer. Cela est résumé ci-après.

2.3.2 Un pouvoir de proposition

a) Dans le monde

Des organismes internationaux synthétisent et harmonisent les diverses propositions faites de par le monde. À titre d'exemple l'OTAN (NATO-OTAN, site web : <http://www.nato.int/ccms>), à travers son Comité scientifique sur les défis de la société moderne se préoccupe :

- des relations science-société-sécurité (environnement) (point de vue général) ;
- des rendements dans l'utilisation de l'énergie (aux niveaux d'entreprises, nationaux ou mondial) ;
- du stockage des déchets nucléaires dans des mines de sel.

Des associations, comme l'ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) ont une division liée à l'énergie (avec édition de numéros spéciaux de la revue *Mechanical Engineering*). Les États-Unis se donnent ainsi 14 challenges « pour la survie au XXI^e siècle » dont l'énergie nucléaire de fusion et de fission.

Il existe aussi des instituts spécialisés dont nous citons deux :

- ITG, *International Gas Turbine Institute* ;
- IIF-IIR, l'Institut international du froid ;

ou des Instituts universitaires : ETH, l'Institut fédéral suisse de technologie, a fait paraître récemment un livre blanc (Jochem E.) sur la recherche et le développement des technologies visant à l'efficacité énergétique.

b) En France

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (<http://www.ademe.fr>) se préoccupe de la coordination de tous les acteurs du domaine que nous explorons en relation avec l'environnement.

L'ATEE, Association technique énergie environnement, est une association plus professionnelle, qui édite une revue bimensuelle d'actualité sur l'énergie et l'environnement (*Énergie Plus*).

La Société française de thermique, SFT (<http://www.sft.asso.fr>), possède par ailleurs un groupe thématique dédié à l'énergétique. Celui-ci est subdivisé en trois sous thèmes :

- transferts thermiques et combustion ;
- thermodynamique ;
- conversion de l'énergie.

Des thèmes transverses leur sont par ailleurs associés, sur les piles à combustibles et les échangeurs de chaleur. Des journées d'études sont régulièrement organisées en relation avec d'autres sociétés et groupements.

Enfin le CNRS, par l'intermédiaire du Programme énergie, se préoccupe des aspects plus amonts.

On notera pour terminer, la parution, à l'initiative de la SFT, d'un livre blanc sur la recherche en thermique (*SFT - Livre blanc*) : celui-ci comporte un chapitre entier sur la thermique des systèmes.

On voit donc que des tribunes existent pour tous les acteurs, mais que le problème le plus délicat reste sans doute la coordination des efforts et la pluridisciplinarité des démarches. L'outil thermodynamique apparaît alors privilégié.

L'ensemble débouche pour les aspects amonts (scientifiques et techniques) qui nous intéressent sur les grandes orientations résumées dans le paragraphe suivant.

2.3.3 Les grandes orientations technologiques

Celles-ci sont détaillées ci-après conformément aux trois grands postes d'usage : industrie, transport, habitat.

a) L'industrie

Dans ce cas il s'agit de production fortement centralisée.

Les *centrales à cycles combinés* vont se développer, particulièrement par l'utilisation croissante de *TAC*, turbines à combustion (dans les transports hors aviation : voir l'exemple du bateau *Queen Mary 2*), mais aussi sous forme de miniturbines (30-400 kW) ; des turbines à gaz à lit fluidisé valorisant la biomasse sont attendus.

De plus, des cycles à charbon avancés devraient se développer. Ces systèmes se prêtent par ailleurs à la cogénération, voire à la trigénération (Descieux D., Feidt M.).

La production centralisée utilisera les évolutions dans le domaine de l'énergie nucléaire.

► Fission et réacteurs nucléaires avancés

Marcus G.H. a proposé une sélection de 6 réacteurs pour les recherches à venir. Pour tenir compte d'informations récentes au niveau européen et français, deux programmes semblent retenus pour le moyen terme :

- réacteurs hybrides (programme européen à l'échelle de temps de 10 à 30 ans) ;
- réacteurs VHTR (*Very High Temperature Reactor*).

La France se propose de développer deux voies à terme de 15 à 50 ans :

- le réacteur à gaz à surgénération (par le CEA) ;
- le réacteur à sels fondus et thorium (par le CNRS).

► Fusion contrôlée

Tout le monde a entendu parler du projet ITER, projet d'envergure, mais de longue haleine.

► L'électricité verte

La micro-hydraulique devrait se développer dans l'avenir, mais aussi et surtout le parc éolien français (*Industries Dossier*), avec pour objectif 20 % de l'électricité produite sous forme renouvelable. L'électricité photovoltaïque, de même que la géothermie devraient participer à ce mouvement.

Aussi il existe onze projets de parcs d'éoliennes offshore pour une puissance de 500 MW, à l'horizon 2007 (selon l'ADEME).

Les cellules photovoltaïques quant à elles, seraient produites en alliage CIS (cuivre-iridium-silicium) par électrodéposition à l'horizon 2100 (étude du consortium CNRS-EDF) : une division du coût par 3 est visée. La géothermie (BRGM-EDF) vise la haute température (180 °C) avec des forages profonds (5 000 m).

b) Les transports

Même si le pétrole offshore est une énergie fossile « à réserve évolutive » (récupération avancée du pétrole), les énergies fossiles sont épuisables. Aussi la biomasse aura un rôle de plus en plus important à jouer, même si le rendement de photosynthèse reste faible (aux environs de 1 %) : les biocarburants sont un enjeu majeur pour demain et nécessitent des études d'adaptation (actuellement, il faut environ 1 ha pour produire 1 t d'huile végétale).

Les études à moyen terme proposent toutefois d'autres alternatives, comme le *moteur hybride Diesel*, pour lequel existent des démonstrateurs (Golf Ecopower : 104 CV, 3,8 l/100 km ; PSA : 90 CV ; Toyota) (*Science et Vie* 2).

À ces expérimentations répondent par ailleurs des études à plus long terme, pour des *véhicules électriques* existant déjà sur le marché :

- batteries perfectionnées, pour 2010 ;
- supraconducteurs à température ambiante, pour 2020 ;
- pile SOFC, pour 2030 (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) ;
- vecteur hydrogène H₂, pour 2030.

Il y a lieu ici de développer les deux derniers points.

► Pile à combustible

Tout d'abord la pile SOFC n'est pas la seule en développement ; la filière PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) est sans doute plus étudiée. Les applications visées vont des transports à l'habitat, en passant par le téléphone portable ; une des caractéristiques recherchée est le rapport énergie/poids (450 Wh/kg au lieu de 180 pour les batteries lithium/ions). La puissance surfacique correspondante est de l'ordre de 300 MW/cm² de surface de réaction (encombrement géométrique).

► Vecteur hydrogène

Le deuxième point est relatif au *vecteur hydrogène*. On distinguera à cet effet les *énergies dites primaires* ou naturelles, des *vecteurs énergétiques* issus d'une transformation des premières. Le tableau 2.3 illustre cette différence fondamentale par des exemples.

TABEAU 2.3 ÉNERGIES PRIMAIRES ET VECTEURS ÉNERGÉTIQUES ASSOCIÉS

Source	Formes primaires	Vecteurs énergétiques
Énergie solaire fossile	Pétrole Bitumes Charbons Tourbes	Hydrocarbures liquides
Énergie solaire renouvelable	Chute d'eau Vent Bois Biomasse	H ₂ , CO (hydrogène, oxyde de carbone)
Énergie terrestre gravitationnelle	Géothermie Marée	Électricité
Énergie nucléaire	Fission Fusion	Eau surchauffée Métaux liquides (chaleur)

Il apparaît à cette occasion des formes stockables, qui revêtent une importance fondamentale dans le domaine des transports, puisqu'elles peuvent être « embarquées », ce qui est le cas majoritaire actuellement. Les espoirs actuels se tournent vers la production du vecteur hydrogène par voie thermodynamique, à des températures comprises entre 400 et 850 °C dans les réacteurs VHTR précédemment cités (études du CEA à Saclay). Les réactions se produisent en milieux extrêmes selon une thermodynamique complexe et manquant de données.

Pour terminer ce tour d'horizon relatif aux transports, on indiquera que le progrès en cours des moteurs à combustion interne (MCI) méritent d'être poursuivis et nous réservent sans doute encore beaucoup de surprises ; par exemple, le moteur Diesel, récemment devenu majoritaire sur le marché français, voit ses caractéristiques environnementales évoluer favorablement grâce aux filtres à particules (FAP). La réduction des émissions d'oxyde d'azote (NO_x) passe sans doute par la combustion humide (Guillet R.). L'évolution des critères d'évaluation redistribue en effet fortement la donne, de façon constante comme le montre le tableau 2.4 relatif à 6 sortes de moteurs et 6 sortes de combustibles (Kreith F., West R.E.).

TABLEAU 2.4 EFFICACITÉS DE MOTEURS DU PUIT À LA ROUE, EN PASSANT PAR LE RÉSERVOIR

Rendement Système	Du puits au réservoir	Du réservoir à la roue	Du puits à la roue
MCI classique : allumage commandé + CH ₄	0,88	0,22	0,19
Hybride à allumage commandé + CH ₄	0,88	0,36	0,32
Diesel classique + mélange fuel FT + CH ₄	0,86	0,26	0,22
Diesel hybride + mélange fuel FT + CH ₄	0,86	0,38	0,32
Diesel chimique + fuel FT	0,66	0,29	0,19
Diesel hybride + fuel FT	0,66	0,45	0,30
MCI classique : allumage commandé + H ₂	0,62	0,22	0,14
Hybride à allumage commandé + H ₂	0,62	0,36	0,22
PACo + H ₂	0,62	0,44	0,27
PACo + CH ₃ OH	0,58	0,28	0,16
Batterie + moteurs électriques	0,48	0,44	0,21
PACo + H ₂ (électrolyse) + moteurs électriques	0,29	0,44	0,13

Remarque : Les notations intervenant dans le tableau ci-dessus ont la signification suivante : FT = Fisher – Tropsch, PACo = pile à combustible.

Il ressort principalement du tableau que l'utilisation immédiate de nouveaux vecteurs énergétiques peut conduire en l'état, ou même avec de nouvelles architectures, à une forte dégradation du rendement du puits à la roue (0,19 → 0,14–0,10).

Réciproquement, une adaptation soignée du moteur au combustible peut conduire à une amélioration importante de ce même rendement (0,19 → 0,32). Les solutions les plus médiatisées ne sont pas forcément les plus prometteuses (0,27).

Des études soigneuses doivent donc être menées.

c) L'habitat

L'énergie utilisée dans l'habitat se caractérise par une faible concentration de la demande, hormis dans les grands centres urbains. Il semble donc qu'il y ait une bonne adéquation entre les énergies de type flux, elles-mêmes de faible densité, et les besoins précédents, en particulier pour l'énergie solaire directe d'où l'intérêt d'une conception « bioclimatique » de l'habitat.

Le problème essentiel vient du décalage (déphasage) temporel courant entre l'offre et la demande : d'où l'importance du couplage avec des formes stockées

d'énergies thermique et/ou électrique. Ce point mérite des études et développements approfondis.

De plus l'excès de chaleur est aussi source d'inconfort et donc de « traitement thermique » : les zones fortement ensoleillées ont surtout besoin de rafraîchissement, voire de climatisation. Nous montrerons qu'il est possible de « faire du froid avec du chaud ».

Au solaire direct correspond aussi l'énergie solaire différée, par l'intermédiaire de la photosynthèse, sous forme de biomasse terrestre ou marine. Cela mérite considération : une prise de conscience récente débouche sur des actions en développement actuellement. On citera, par exemple, la Combustion en lit fluidisé des déchets solides de type biomasse.

Une autre voie prometteuse, peu considérée en France actuellement, est la *microcogénération*. Celle-ci peut revêtir des formes très diverses (Descieux D. et Feidt M.), voire même aboutir à la *trigénération*. L'avantage serait d'avoir sous *forme intégrée*, minimisant les pertes de distribution, un système utilisant de façon optimale l'énergie pour répondre à l'ensemble des besoins : force – chauffage – froid, climatisation – eau chaude sanitaire. De nombreuses recherches et développements sont à venir dans ce domaine ; la dernière référence citée évoque les problématiques actuelles et les verrous associés.

2.4 CONCLUSIONS

2.4.1 L'efficacité énergétique

Le présent chapitre a mis en exergue l'importance du *coût de l'énergie* et l'émergence forte de la *contrainte de l'environnement*, toutes les deux à un niveau mondial, avec l'émergence des puissances potentielles que sont la Chine, l'Inde, le Brésil et sans doute d'autres pays.

Il en résulte la nécessité de disposer de systèmes visant la qualité, la flexibilité et l'*efficacité de transformation et d'utilisation des sources* d'énergie.

Des progrès techniques et technologiques sont à rechercher pour réduire les intensités énergétiques, et par conséquent augmenter les rendements de transformation de l'énergie.

Dans l'industrie et l'agroalimentaire les progrès attendus sont :

- amélioration des systèmes à moteurs électriques ;
- gestion des chaleurs perdues ;
- perfectionnement et diffusion de techniques plus performantes.

Dans les transports, on vise des transports plus économes avec prise en compte de la pollution et de l'effet de serre.

Dans l'habitat, on tend à l'amélioration de l'efficacité de chauffage, de climatisation, et d'éclairage des locaux.

En résumé, l'objectif de l'avenir est une *Gestion optimale de l'énergie* (GOE), qui passe sans doute de façon privilégiée par l'*Optimisation thermodynamique généra-*

lisée (OTG) : l'efficacité énergétique suppose une recherche-développement et des investissements soutenus, ainsi que des normes techniques exigeantes à venir.

2.4.2 L'évolution envisagée de la demande et de l'offre

La demande en électricité va croître immanquablement dans l'avenir, notamment avec les grands pays émergents. Les combustibles fossiles devraient rester prédominants dans les 50 ans à venir, alors que le nucléaire fournira 10 à 15 % de l'énergie ; l'usage du charbon ne sera pas sans poser problème, alors que les énergies renouvelables ont une émergence difficile : quand atteindront-elles 40 à 50 % des besoins ?

Quoi qu'il en soit, un bouquet des énergies et des systèmes (TAC ; systèmes combinés) est inévitable. Dans le domaine des transports, les véhicules hybrides électriques et les carburants propres vont se développer, ainsi que de nouveaux modes (ferroutage).

Dans l'habitat des systèmes intégrés et décentralisés sont attendus.

2.4.3 Des ruptures possibles

La raréfaction de l'énergie fossile et « facile » induisant une forte augmentation du prix de l'énergie, des ruptures deviennent probables. Pour ce qui les concernent, les scientifiques doivent anticiper. P. Le Goff estimait qu'il y avait un prix écologique critique de l'énergie exploitable sur « les fluctuations de contenu énergétique de l'eau et de l'air ».

L'énergie de l'eau est assez bien connue sous forme de l'énergie :

- des vagues ;
- marémotrice ;
- d'altitude (chute d'eau) ;
- d'écart de température fond-surface ;

Elle l'est moins sous forme d'écart de concentration (eau douce/eau salée).

L'énergie de l'atmosphère peut revêtir 4 formes (dont une est bien connue) :

- énergie cinétique (vent) ;
- énergie thermique ;
- énergie de pression ;
- énergie liée à l'humidité.

L'avenir dira si ces directions de recherche tiendront leurs promesses pour l'humanité du futur.

BIBLIOGRAPHIE

- CNRS Focus, *L'énergie*, avril 003, www.imp.cnrs.fr/energie
- DESS-EMI, *L'énergie au XXI^e siècle*. Conférence Université Henri Poincaré Nancy, année 2004-2005.
- DESCIEUX D. et FEIDT M., *Étude de terrain sur la cogénération*. Rapport d'expertise AC ÉNERGIE GAT 9 CNRS, janvier 2005.
- GUILLET R., *Du diagramme hygrothermique de combustion aux pompes à vapeur d'eau, un nouveau regard sur la combustion et ses applications énergétiques*. Paris, Elsevier, 1998.
- Industries Dossier, *Électricité Verte, les projets de la France*. N° 102, p. 9-19, février-mars 2005.
- JOCHEM E, *Steps Towards a Sustainable Development, White Book for RetD of energy efficient technologies*, mars 2004.
- KREITH F. et WEST R.E., *Transportation Quarterly*. Vol. 56, n° 1, p. 51-73, 2002.
- LE GOFF P., *Les sources d'énergie au XXI^e siècle*, conférence DESS EMI, UHP, Nancy, 2003.
- LE GOFF P., *L'énergétique face à l'économie et à l'écologie*, conférence DESS EMI, UHP, Nancy, 2003.
- MARCUS G.H., *A New World of Power*, supplément *Mechanical Engineering Power*, 2003.
- MARTIN J.-M., *Perspectives énergétiques mondiales. Techniques de l'Ingénieur*, B8515, 10 pages, 1996.
- NATO – OTAN, *Bulletin n° 68*, édition 03, 2004 www.nato.int/ccms
- PREDIT, *Lettre du Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports*. N° 11, mars 2005, www.predit.prd.fr
- Science et Vie 2, L'énergie, transports*, p. 114-122, janvier 2005.
www.ademe.fr
- Énergie Plus*, bimensuel d'actualité sur l'énergie et l'environnement. N° 345, mai 2005.
www.sft.asso.fr, SFT, *La Recherche en Thermique, enjeux et perspectives en 2005*. Livre Blanc, chapitre 5, version 3 provisoire, novembre 2004.

Chapitre 3

L'énergie

3.1 LES FORMES DE L'ÉNERGIE

3.1.1 Un point d'histoire du développement de l'humanité

L'énergie se manifeste sous diverses formes dans le monde qui nous entoure.

Il ne sera plus fait ici de référence à des énergies primaires ou non, ni à ce qui est qualifié parfois de vecteur énergétique. Le point de vue adopté est délibérément différent pour donner une vision plus scientifique et physique à l'étude proposée.

Primitivement c'est l'énergie calorifique (ou chaleur, de préférence à l'énergie thermique), qui a retenu l'attention de l'humanité : la domestication du feu (combustion) a permis dans un premier temps la cuisson des aliments, puis le chauffage. Après seulement est apparue l'énergie mécanique.

3.1.2 Recensement des formes de l'énergie

a) *L'énergie mécanique*

L'énergie mécanique est la deuxième forme d'énergie à avoir été maîtrisée par l'homme, surtout dans l'Antiquité (levier, poulie, voile, rame...).

On voit ainsi que l'aspect applicatif (technologique, technique ou expérimental) a précédé l'aspect fondamental (formel, scientifique) ; la mécanique a sans doute été la première science physique à se développer de façon forte, précisément dès l'Antiquité.

L'énergie mécanique elle-même peut prendre diverses formes.

➤ Énergie cinétique, énergie potentielle

L'énergie cinétique est liée au mouvement du corps considéré. L'énergie potentielle est liée à la position du corps, dans l'espace où il est immergé.

L'énergie potentielle du mécanicien est couramment associée au champ de pesanteur (environnement terrestre) ; l'accélération de la pesanteur prend en moyenne à la surface du globe terrestre la valeur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

➤ Énergie de rotation, énergie de translation

Le mouvement général d'un corps solide supposé indéformable est décrit par la superposition de deux mouvements :

- Un mouvement de translation du corps dans l'espace où il est immergé. Ce mouvement se fait identiquement pour tous les points du solide ; il est commode de l'étudier par rapport au centre de masse de celui-ci, se déplaçant dans un repère appelé référentiel (mouvement par rapport au référentiel).
- Un mouvement de rotation du corps dans l'espace. Le mouvement est un mouvement différent pour chaque point du solide ; il est commode de l'étudier dans un repère déduit du référentiel précédent, mais transporté au centre de masse du solide.

b) L'énergie électrique

Dès l'Antiquité, la triboélectricité a permis de mettre en évidence l'attraction de charges de signes contraires (+ et -), ou la répulsion de charges de même signes (+ + et - -).

Il apparaît alors comme pour l'énergie mécanique une énergie potentielle, mais associée cette fois au champ électrique (électrostatique).

À cette forme d'énergie électrique correspond aussi une énergie électrocinétique ; cette énergie électrique est caractérisée par le mouvement de charges électriques dans un champ électrique.

On rencontre alors les deux formes correspondantes courantes de l'énergie électrique, qui sont les suivantes.

➤ L'énergie électrique de type continu

Cette forme de l'énergie électrique est le plus souvent de faible intensité et faible tension. Elle est très utilisée dans les dispositifs électroniques grand public, et dans des systèmes embarqués pour les transports, voire l'énergie photovoltaïque.

➤ L'énergie électrique de type alternative

Il s'agit de l'énergie électrique des réseaux centralisés, qui peuvent fonctionner selon les usages sous très forte tension (400 000 V) et sous très forte intensité (par exemple pour usages industriels). L'utilisation courante en France se fait en courant monophasé sous 220 V et une intensité de ligne de l'ordre de 10 A.

c) Énergie magnétique

Cette énergie est intimement liée au champ du même nom. Et il existe un parallèle fort avec l'énergie électrique du point de vue formel.

Pour l'application, le couplage électromagnétique est essentiel.

Selon les matériaux, les manifestations du magnétisme peuvent être très variées et différentes ; on notera l'existence de matériaux :

- paramagnétique ;
- ferromagnétique...

La structure intime de la matière joue alors un rôle fondamental (la thermodynamique statistique permet des modélisations pertinentes de ces phénomènes).

d) Énergie radiative

L'énergie radiative, dont la plus connue est l'énergie lumineuse (visible), est une énergie combinant les deux formes précédentes d'énergie : c'est une énergie électromagnétique particulière dont la longueur d'onde est visible par l'œil dans le domaine compris entre 0,4 μm et 1 μm .

Toutefois, il existe de nombreuses autres radiations ; en allant du plus énergétique vers le moins puissant, on rencontre les rayons γ , X, les rayons ultraviolets (UV), le spectre visible, puis les rayonnements infrarouges (IR) et enfin les rayonnements radiométriques.

L'énergie radiative présente la particularité de ne pas nécessiter de support matériel pour se propager. Les expériences ont montré qu'elle peut se propager de deux façons :

- soit sous forme ondulatoire ;
- soit sous forme corpusculaire (photon) ;

avec équivalence entre les deux formes, comme l'a montré Louis de Broglie.

e) Énergie chimique

L'énergie chimique est une énergie liée à la conformation des cortèges électroniques autour des noyaux des atomes et molécules. Les cortèges tendent vers des configurations de stabilité croissante, correspondants à des minima énergétiques de l'ensemble ayant réagi.

L'exemple le plus simple de réaction chimique est la combustion. Cette réaction met en jeu un combustible et un comburant (très souvent de l'air) ; la réaction peut être violente (comme dans un moteur thermique) ou lente (oxydation d'un métal à l'air libre).

Selon le mode de réaction, une certaine énergie calorifique est mise en évidence de façon concomitante :

- réaction exothermique (avec libération de chaleur) ;
- réaction endothermique (nécessitant un apport de chaleur pour se développer).

f) Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est une énergie liée cette fois au noyau de certains atomes et à la façon dont les particules élémentaires qui le constituent sont maintenues dans ce noyau. Certains noyaux sont très stables, d'autres moins et ce d'autant plus que leur masse (le nombre de particules les constituant) est élevée.

On distingue de ce fait deux formes essentielles de l'énergie nucléaire :

- la fission nucléaire qui consiste à casser un atome lourd et instable en plusieurs morceaux, généralement sous impact neutronique ; dans ces réactions de fission, il apparaît un défaut de masse. À ce défaut de masse correspond une énergie libérée, sous forme calorifique dans le milieu ;
- la fusion nucléaire, qui utilise à l'opposé des atomes légers, qui par confinement et impact peuvent produire des atomes plus lourds. Le projet ITER relève de cette filière. Là aussi, sous conditions très spécifiques (à maîtriser : ce qui est un des enjeux de l'expérience), il y a défaut de masse dans la réaction nucléaire ; ce défaut correspond encore à une énergie libérée globalement selon la relation suivante :

$$\Delta E = c_0^2 \cdot \Delta m \quad (3.1)$$

où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide.

g) Énergie calorifique

Évoquée précédemment, on peut noter que la première énergie utilisée par l'humanité apparaît aussi couplée à d'autres formes d'énergie telles que les énergies chimique et nucléaire. Il en existe plusieurs formes.

L'énergie calorifique joue un rôle très particulier dans l'ensemble des formes d'énergie ; elle apparaît aussi bien à l'échelle macroscopique des systèmes, que dans la structure plus intime de la matière.

➤ Énergies calorifique-frigorifique

Cette forme d'énergie revêt aujourd'hui une importance toute particulière dans ses applications directes :

- chauffage → énergie calorifique ;
- réfrigération → énergie frigorifique.

Elle fait apparaître la notion de référence à l'ambiance locale, sur laquelle on veut influencer (l'énergie dans un environnement).

Elle est présente aussi dans les systèmes utilisant des énergies dites nobles, dont la mécanique, par exemple :

- les moteurs électriques sont sujets à des échauffements ;
- les pneumatiques se mettent en température au roulage... (le lecteur pourra rechercher d'autres exemples).

Ces phénomènes traduisent en fait des dissipations d'énergie sous forme calorifique sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

► Chaleur sensible – chaleur latente

D'un point de vue thermodynamique, il convient de distinguer par ailleurs deux formes d'énergie calorifique :

- la chaleur sensible qui est liée à l'évolution de la température de milieu matériel recevant ou cédant de la chaleur ;
- la chaleur latente qui a pour originalité d'être échangée dans des conditions de température constante pour les changements de phase d'un corps pur. Généralement, les quantités de chaleur échangées sont plus grandes que pour les échanges de chaleur sensible, d'où leur importance pratique.

3.1.3 L'importance des formes d'énergie

Il ressort du catalogue succinct précédent un aspect multiforme de l'énergie. Cette diversité de formes induit de nombreuses possibilités :

- de conversion d'une forme d'énergie dans une autre ;
- de transfert, sous une forme bien définie d'énergie ;
- de transport, sous une forme bien définie d'énergie ;
- de stockage, sous certaines formes d'énergie.

C'est ce qui va être examiné dans les paragraphes qui suivent.

3.2 LA CONVERSION D'ÉNERGIE

3.2.1 Définition et historique

La conversion d'énergie est un processus qui voit le passage d'une forme d'énergie initiale vers une forme d'énergie finale.

La conversion d'énergie existe dans la nature sous des aspects très variés. Par exemple à l'échelle de l'homme, la maîtrise du feu correspond à la maîtrise d'une combustion, c'est-à-dire d'une réaction d'oxydation dont le processus marque le passage d'une énergie chimique (de réaction) à une énergie calorifique :

énergie chimique → (réaction de combustion) → énergie calorifique

À l'échelle de l'Univers, le Cosmos est dominé par l'énergie radiative, avec des opérations de conversion complexes au cœur des objets célestes. La compétition entre énergie et matière donne lieu à l'observation de structures allant des amas de galaxies aux galaxies, puis aux étoiles. Les étoiles sont des convertisseurs matière-énergie.

matière → (réaction nucléaire) → énergie radiative

Le cas particulier du Soleil est intéressant car c'est l'étoile la plus proche de nous. À l'échelle du Système solaire, cette étoile est environnée par des planètes et par son énergie radiative, elle a permis l'apparition de la vie sur une des planètes, la Terre (peut-être sur d'autres ?).

L'équilibre dynamique de notre planète est encore mal connu. En particulier, du point de vue thermique, il apparaît que cet équilibre fragile est sensible à la composition de l'atmosphère gazeuse, entourant la masse minérale et liquide : on entrevoit

ici l'interaction que l'homme peut avoir par son activité sur les phénomènes de conversion d'énergie et la modification notable de l'équilibre associé.

Depuis son apparition sur la Terre, l'homme a cherché à comprendre son environnement et les phénomènes naturels, puis à en user. Ce mimétisme de la nature a été amplifié par l'usage de techniques, puis de technologies de plus en plus développées tant en qualité, qu'en quantité. Ainsi à une échelle locale, l'homme a utilisé l'énergie du vent (voiles marines, moulins), l'énergie des chutes d'eau (moulins, centrales), de combustibles solides (charbon, pétrole), enfin l'énergie nucléaire ; autant d'exemples de conversion d'énergie.

Il est important de noter que l'échelle des convertisseurs a évolué dans le temps :

taille croissante	↓	– voile ; moulins à vent, à eau
		– chaudières particulières ou industrielles
		– centrales nucléaires

3.2.2 Matrice de conversion des énergies

Ayant identifié les formes principales d'énergie, il est intéressant de construire une matrice des conversions d'énergie correspondante. Le tableau 3.1 rend compte de cette matrice.

On a fait apparaître dans ce tableau les principaux modes de conversion et les sciences qui leurs sont associées. Certaines ne sont pas parfaitement identifiées. Cela ne veut pas dire pour autant que les conversions n'existent pas.

Par exemple, la conversion radiative – mécanique existe bien. Elle se manifeste par une pression de radiation. Celle-ci a donné lieu à des réalisations que l'on peut observer dans les cabinets de physique : radiomètre de Crookes (figure 3.1).

La pression de radiation met en mouvement un moulinet. Mais d'autres réalisations plus pratiques sont possibles ou existent : voiles solaires.

Le lecteur pourra continuer à exercer sa sagacité sur d'autres exemples.

Pour terminer sur la matrice des conversions d'énergie, on notera que la diagonale descendante correspond pour chaque forme à un processus qui ne peut être que de transfert ou de transport (paragraphes 3.3 et 3.4.2). Toutefois, nous avons vu qu'une forme fondamentale d'énergie peut revêtir plusieurs formes secondaires ; alors il peut apparaître des conversions secondaires (paragraphe a) de la section 3.1.2).

À titre d'exemple on citera :

- la conversion potentiel-cinétique ; cette conversion peut apparaître pour plusieurs domaines scientifiques cités (mécanique, électrique, magnétique) ;
- la conversion d'énergie mécanique (cinétique de translation, en rotation (ou réciproquement)).

En termes de technologie, cela correspond à l'ensemble bielle-manivelle, bien connu pour son usage dans les moteurs : à la matrice du tableau 3.1 correspond donc une matrice plus complexe des technologies (convertisseurs), à laquelle le lecteur pourra réfléchir, vu son expérience personnelle et son environnement : voir tableau 3.2.

TABLEAU 3.1 MATRICE DES CONVERSIONS D'ÉNERGIE (DOMAINES SCIENTIFIQUES ET SCIENCES CORRESPONDANTES)

Forme d'énergie	Mécanique	Électrique	Magnétique	Radiative	Chimique	Nucléaire	Calorifique
Mécanique		Mécano-électrique					Mécanothermique
Électrique	Électromécanique		Électromagnétique	Électrothermie	Électrochimie	Électronucléaire	Électrothermie
Magnétique	Magnétomécanique	Magnéto-électrique					Magnétothermie
Radiative		Photovoltaïque			Photosynthèse		
Chimique		Électrochimie					Thermochimie
Nucléaire		Électronucléaire		Physique nucléaire			Thermonucléaire
Calorifique	Thermomécanique	Thermo-électricité	Thermomagnétisme	Thermocinétique ; rayonnement	Thermochimie		

TABLEAU 3.2 MATRICE DES CONVERTISSEURS D'ÉNERGIE

Forme d'énergie	Mécanique	Électrique	Magnétique	Radiative	Chimique	Nucléaire	Calorifique
Mécanique	piston turbine	alternateur					frottements
Électrique	moteurs électriques	transformateurs convertisseurs	électroaimant	Haut parleur Tube radiant	Électrochimie		résistance (effet Joule)
Magnétique							hystérésis
Radiative	radiomètre voile solaire	cellule photovoltaïque			plantes (photosynthèse)		capteur solaire thermique
Chimique		pile à combustible			réacteurs gazéification, pyrolyse, hydrolyse		brûleur chaudière
Nucléaire				rayons γ , β			réacteur nucléaire
Calorifique	moteurs thermiques				réacteurs		transferts (3 modes) changement de phase



Figure 3.1 Un radiomètre de Crookes (Photographie : Michel Feidt)

3.3 TRANSFERT D'ÉNERGIE

3.3.1 Définition et exemple

Comme il a été vu dans le tableau 3.1 de la matrice de conversion des énergies, la diagonale descendante correspond essentiellement aux opérations de transfert ou de transport d'une même forme d'énergie.

Cela suppose successivement deux nouvelles formes secondaires d'énergie, si elles existent :

- une énergie flux ;
- une énergie stock.

Nous nous intéressons principalement à la thermodynamique ; dans cet ouvrage, nous étudierons la forme la plus connue de l'énergie flux qu'est l'énergie calorifique.

La chaleur est sujette à trois modes de transfert :

- la conduction de la chaleur, qui nécessite un support matériel souvent supposé indéformable ;
- la convection de la chaleur, qui fait intervenir un support fluide en mouvement naturel ou forcé ;
- le rayonnement, quant à lui, ne nécessite pas de support matériel.

3.3.2 Régime dynamique stationnaire

De façon à ne considérer que le transfert d'énergie, nous supposons ici un régime de fonctionnement (ou état du système) dynamique stationnaire, par opposition au régime transitoire ou instationnaire qui fait intervenir un stock (voir paragraphe 3.4).

Un système ou procédé en régime dynamique stationnaire n'est pas en équilibre véritable avec son environnement ; on peut dire qu'il est en équilibre dynamique sous l'action de contraintes externes.

On citera comme exemples :

- une chute d'eau, de hauteur constante ;
- un réseau d'air comprimé, dont la pression d'alimentation est maintenue constante par rapport à la pression atmosphérique ;
- la température froide de conservation d'une installation de réfrigération (par exemple un réfrigérateur ménager) réglée par rapport à la température ambiante.

On retiendra que :

Le régime dynamique stationnaire d'un système ou procédé par rapport à une propriété suppose que celle-ci est localement constante et indépendante du temps, mais que cette propriété est une fonction de l'espace (du point).

On conçoit que pour un même système, il peut exister une multiplicité de régimes dynamiques stationnaires. Parmi ceux-ci, l'un d'eux a un rôle fondamental : il s'agit du *régime nominal*. Ce régime de fonctionnement est encore appelé plein régime, ou régime de pleine charge. Il répond généralement à un protocole d'essai défini par des normes strictes.

L'exemple le plus connu est sans doute la consommation d'un véhicule automobile en régime stabilisé, le régime nominal correspondant à la vitesse maximale.

Le dimensionnement (la conception d'un système) s'effectue par rapport au régime dynamique particulier qu'est le régime nominal. L'élaboration de modèles conduit dans ce cas à l'*optimisation de conception*.

Remarque : un régime nominal n'est pas forcément optimal.

3.3.3 Les modèles de transfert en régime dynamique stationnaire

En généralisant ce qui vient d'être vu dans les paragraphes 3.3.1 et 3.3.2, et en appelant X la variable d'intensité locale (pression, température, hauteur d'eau...), on s'aperçoit qu'à une différence d'intensité (un gradient) de X sera associé un flux d'une extensité Y , noté $\dot{Y}$ (pour dérivée de Y par rapport au temps).

Dans les exemples précédents ;

- à un gradient de pression est associé un transfert de masse (gaz) ;
- à un gradient de température est associé un transfert de chaleur (flux de chaleur).

De façon formelle, le flux $\dot{Y}$ est proportionnel à grad X , mais cela ne constitue qu'une approximation linéaire locale, bien que couramment admise :

$$\dot{Y} \approx \text{grad } X \quad (3.2)$$

De façon plus globale, il y correspond la notion de conductance de transfert K , ou de résistance de transfert R , telle que $R = 1/K$. Ici généralisée, la proportionnalité des flux à l'écart d'intensité ΔX devient :

$$\dot{Y} = K \Delta X \quad (3.3)$$

Ces notions sont utiles pour tous réseaux de distribution, y compris l'information.

3.4 STOCKAGE ET TRANSPORT D'ÉNERGIE

3.4.1 Stockage d'énergie

a) Régime instationnaire ou transitoire

La notion de stockage (ou déstockage) d'énergie est incontournable en régime instationnaire ou transitoire. Ce régime apparaît lorsque l'une des contraintes externes au système est changée (changement de régime ; commande). Ce changement de régime peut prendre des formes très variées, comme il sera revu plus tard.

Le régime transitoire s'étend dans le temps de l'instant initial de la perturbation, jusqu'à l'instant où le système atteint un nouvel état d'équilibre dynamique stationnaire, si cela est possible.

Des exemples de telles évolutions sont :

- des adaptations au chauffage ou au refroidissement d'habitats ou de locaux ;
- des accélérations ou décélérations de véhicules ;
- des mises en régime (ou arrêt) de machines.

On retiendra que :

Le régime transitoire d'un système ou d'un procédé par rapport à une propriété suppose que celle-ci observée localement, va varier dans le temps, jusqu'à rejoindre un nouvel état d'équilibre dynamique (voire d'équilibre avec l'environnement).

b) Notion de constante de temps

Les phénomènes transitoires peuvent être lents ou rapides. Dans le domaine de l'énergie, les transitoires thermiques sont plutôt lents, les transitoires mécaniques sont plutôt rapides, les transitoires chimiques sont très rapides (combustion).

Il apparaît alors des *constantes de temps* ou des *temps caractéristiques des phénomènes* qui représentent les échelles de temps des phénomènes étudiés.

Un cas particulier est la *relaxation* d'un système vers l'ambiance. On parle alors de temps de relaxation : celui-ci mesure la durée mise par le système pour passer de l'état initial à l'état d'équilibre avec l'ambiance, pour la propriété relaxée.

L'équilibre correspondant est un équilibre qui peut être partiel. L'équilibre thermodynamique par rapport à l'ambiance suppose la relaxation de toutes les propriétés par rapport à cette ambiance.

Remarque : Pour l'Univers, il n'existe qu'un seul équilibre thermodynamique, correspondant à la mort de celui-ci : fin de l'évolution.

c) *Notion de capacité*

Par opposition à une énergie flux (l'électricité est l'exemple le plus courant), l'énergie stock suppose des réservoirs, notamment :

- réservoir de liquide (combustibles pour les transports, château d'eau, lac de retenue, réservoir d'énergie potentielle gravifique) ;
- réservoir de gaz (stockage sous pression) ;
- stockage solide (énergies fossiles : charbon, lignite, minerais radioactifs ; énergie biomasse : bois, matières végétales dont pailles ; énergie chimique : piles sèches) ;
- réservoir de chaleur (chauffe-eau à accumulation).

Il apparaît alors la notion de *capacité*, massique, chimique, thermique, électrique : la capacité représente alors un réservoir pour une extensité donnée.

Toute forme d'énergie peut donner lieu dans le principe à accumulation. Toutefois, les capacités mises en œuvre restent finies, et en conséquence, leurs réserves énergétiques épuisables, d'où la nécessité d'une bonne évaluation et gestion des stocks pour une valorisation optimale de l'énergie.

Si les capacités des systèmes, particulièrement les capacités thermiques, sont de dimensions finies, nous serons amenés à raisonner sur des thermostats, qui sont des réservoirs thermiques de capacité infinie (pouvant recevoir ou céder de l'énergie calorifique, sans modification de leur température).

Le meilleur exemple de thermostat était jusque récemment l'atmosphère terrestre, considérée de température quasi constante à l'échelle de nos activités. Cependant, il s'avère que la perturbation apportée par l'homme n'est plus insignifiante, même si elle reste négligeable pour la majorité des applications qui nous intéressent.

Enfin et pour terminer avec le stockage de chaleur, il ne faut pas perdre de vue que si le stockage chaud (température supérieure à l'ambiance) est le plus courant, le stockage froid n'en revêt pas moins une grande importance pratique (température inférieure à l'ambiance).

3.4.2 Le transport d'énergie

Le transport d'énergie est une opération intimement liée à la possibilité de stockage de l'énergie correspondante.

Le transport en réservoir est une opération bien connue pour de nombreux combustibles fluides. Le transport en phase gazeuse nécessite quant à lui, pour des raisons d'encombrement, des conditions très différentes de l'ambiance (pressions plus élevées). C'est en particulier un des problèmes actuels du vecteur énergétique émergent, l'hydrogène, ce qui induit des difficultés de mise en œuvre.