

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Clima+confort & www.climaplusconfort.fr

L'offre d'information bimédia des professionnels
du génie climatique



8 numéros par an

- Des enquêtes marchés pour une approche ciblée auprès de vos clients.
- Des dossiers complets sur les meilleures solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.
- L'actualité marquante de la profession détaillée et analysée : réglementation, formation, etc...

À tout moment sur www.climaplusconfort.fr avec vos codes d'accès

- Un accès aux ressources métiers en illimité à des documents de référence (textes législatifs, bases documentaires multimédia, schémas techniques, ...).
- Des dossiers d'experts délivrés par des professionnels reconnus : des cas concrets, des retours d'expériences, etc.
- Tous les articles archivés de Clima+confort.
- Une base de données produits et services et un annuaire Pro.



Pour vous abonner, rendez-vous sur www.climaplusconfort.fr/Boutique
ou contactez-nous au 01 53 26 48 00

Michel Feidt



GÉNIE ÉNERGÉTIQUE


Du dimensionnement
des composants au pilotage
des systèmes

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture : © JustContributor – Fotolia.com

| | | |
|--|--|---|
| <p>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.</p> <p>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</p> |  | <p>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).</p> |
|--|--|---|

© Dunod, Paris, 2014
ISBN 978-2-10-070545-0

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.1.1 Introduction | 899 |
| A.1.2 Cinématique du solide | 899 |
| A.1.3 Cinétique | 901 |
| | |
| ANNEXE 2 • MATHÉMATIQUE – TRANSFORMATION DE LEGENDRE | 903 |
| A.1.1 Expression des équations de Navier-Stokes en systèmes de coordonnées cartésien, cylindrique, sphérique | 903 |
| A.1.2 Facteur intégrant | 905 |
| A.1.3 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 (\approx) 11 630 kWh (unité hors système) ;
- 1 Mtep représente 1 million de tep ;
- 1 tonne de charbon \approx 0,6 tep ;
- 1 tonne de bois \approx 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 (CO₂) atmosphérique et l'effet de serre correspondant. En fait, d'autres gaz participent à ce même effet : vapeur d'eau, méthane (CH₄), oxyde d'azote (NO_x) principalement.

Depuis 1850 (début de l'ère industrielle), la concentration en CO₂ a augmenté de 30 %, celle de CH₄ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 (SO₂), 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 |

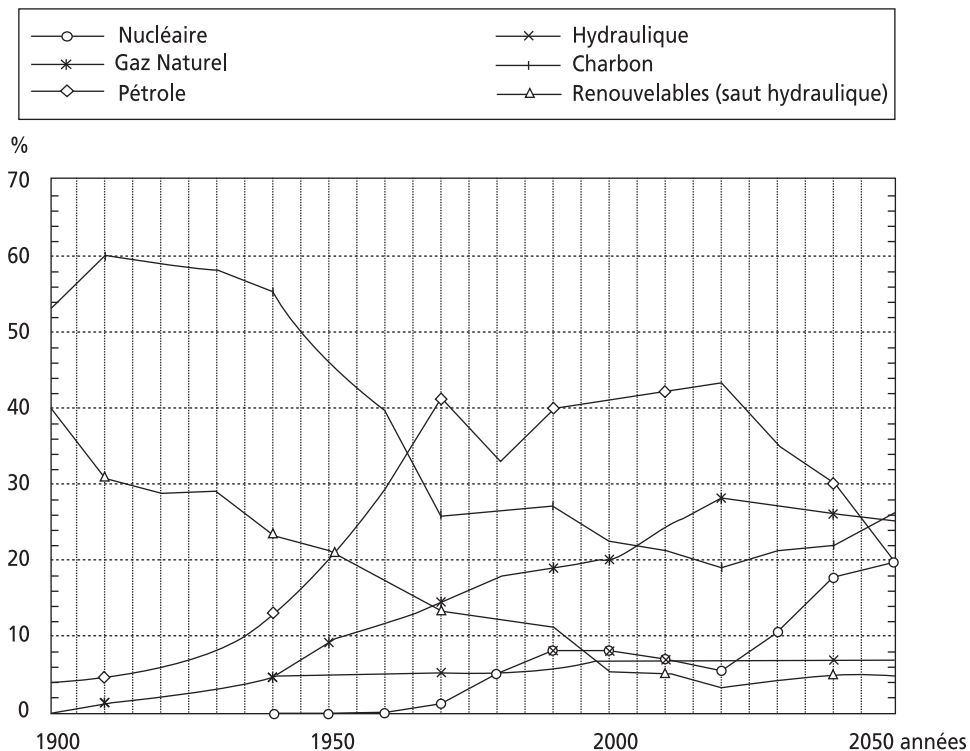


Figure 2.1 Évolution possible des contributions relatives des diverses sources d'énergie (source : Total)

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 au 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).