



**Physique fondamentale et énergétique :
les multiples visages de l'énergie**

par
Roger Balian
de l'Académie des Sciences

**Conférence introductive de l'Ecole d'Eté de Physique sur l'énergie
Caen – 27 août 2001**

Physique fondamentale et énergétique : **les multiples visages de l'énergie**

Roger Balian
SPHT, CEA SACLAY
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX
balian@spht.saclay.cea.fr

Table des matières

1. L'élaboration du concept d'énergie
 - 1.1. Energie mécanique
 - 1.2. Premières études sur la chaleur
 - 1.3. Naissance de la thermodynamique
 - 1.4. La thermodynamique des processus irréversibles
 - 1.5. L'apport de la physique statistique
 - 1.6. L'apport de la mécanique quantique, de la relativité et de la physique des particules

2. Conséquences énergétiques des principes fondamentaux
 - 2.1 Premier principe
 - 2.1.1 Transformations de l'énergie
 - 2.1.2 Unités
 - 2.2 Deuxième principe
 - 2.2.1 Irréversibilité, dissipation d'entropie et dégradation de l'énergie
 - 2.2.2 Bilan d'énergie et d'entropie
 - 2.3 Principes de la thermodynamique hors équilibre
 - 2.3.1 Les équations dynamiques
 - 2.3.2 Taux de dissipation
 - 2.4 Hiérarchie des énergies
 - 2.4.1. Interaction forte
 - 2.4.2. Interaction électromagnétique
 - 2.4.3. Interaction faible
 - 2.4.4. Interaction gravitationnelle

3. Comparaisons
 - 3.1. Concentration
 - 3.2. Dégradation
 - 3.3. Transport
 - 3.4. Stockage
 - 3.5. Réserves
 - 3.6. Nuisances

4. Conclusions

Sommaire

Après un exposé historique de l'élaboration du concept d'énergie, on rappelle dans la perspective des applications les principes physiques fondamentaux associés à ce concept : premier principe et deuxième principe de la thermodynamique, dynamique des processus irréversibles, hiérarchie des interactions élémentaires. On examine leurs conséquences sur les questions d'énergétique en comparant les formes courantes de l'énergie de divers points de vue : concentration, dégradation, transport, stockage, réserves et nuisances. Ces comparaisons s'appuient sur les valeurs caractéristiques des grandeurs en jeu.

1. L'élaboration du concept d'énergie

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

Comme on le voit en consultant dictionnaires ou encyclopédies, l'énergie ne peut être définie qu'indirectement. Bien qu'elle soit liée aux propriétés de la matière, c'est un objet mathématique abstrait. Nécessaire à une formulation précise du premier principe de la thermodynamique, elle apparaît à l'échelle microscopique comme une grandeur dynamique, ainsi qu'on le verra plus loin (fin de la section 1.1). Il s'agit d'une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de celui-ci à l'instant considéré ; elle dépend en particulier des positions et vitesses des parties du système et de leurs interactions mutuelles. Son caractère essentiel est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

L'assimilation du concept d'énergie suppose une longue familiarisation avec ses divers aspects et avec les phénomènes où il intervient. Bien que l'histoire de son élaboration soit longue et tortueuse, certains épisodes sont éclairants et présentent un intérêt pédagogique. Ils exhibent aussi d'instructives interactions entre sciences et techniques. C'est pourquoi nous en donnons ci-dessous un aperçu ; de nombreux autres aspects biographiques ou anecdotiques intéressants sortent du présent cadre. On consultera avec fruit le monumental *Dictionary of scientific biography* de C. C. Gillispie (Scribner's, New York, 1981, 16 volumes). Seul l'historique du premier principe est présenté ici avec quelque détail ; pour le deuxième principe, on pourra lire la section 3.4 du livre *From microphysics to macrophysics* de R. Balian (Springer, tome I, 1991 ; édition française en préparation).

Les sections 2 et 3 du présent exposé peuvent être abordées indépendamment de l'historique ci-dessous.

1.1. Energie mécanique

Même en ce qui concerne la dynamique de processus *non dissipatifs* comme les mouvements des astres, les oscillations d'un pendule non amorti, les chocs élastiques de solides idéaux ou la dynamique de fluides non visqueux, la notion d'énergie mécanique, grandeur conservative, n'est apparue clairement qu'au milieu du XIX^{ème} siècle. De tels processus sont caractérisés par l'évolution des variables décrivant les positions des divers éléments du système. Isaac Newton (1642-1727) trouva entre 1665 et 1667 les équations qui régissent cette évolution ; il les publia en 1687 dans ses *Philosophiae naturalis principia mathematica*. La conservation au cours du temps de la quantité de mouvement fut reconnue très tôt, par Christiaan Huygens, physicien et astronome (la Haye 1629-1695), mais il fallut plus d'un siècle pour montrer que les équations du mouvement conservaient aussi une autre grandeur, l'énergie.

Un premier pas fut accompli grâce à l'établissement par Lagrange du « *théorème des forces vives* » : le travail reçu par chaque point matériel (de masse m et de vitesse \mathbf{v}) d'un système au cours d'un processus non dissipatif est égal à la moitié de l'accroissement de sa force vive mv^2 . Afin de passer de là à la conservation de l'énergie mécanique, somme des énergies potentielle et cinétique, il restait à reconnaître que les forces appliquées au système dérivent en général d'un potentiel, puis à identifier leur travail à la diminution d'une certaine fonction des variables de position appelée « énergie potentielle », enfin à baptiser « énergie cinétique » la demi force vive.

Ces étapes furent entravées par l'absence d'un vocabulaire adéquat. Sans doute en raison du rôle central que Newton faisait jouer à la force dans sa formulation des équations de la dynamique, le mot de *force* fut longtemps employé non seulement dans son sens actuel mais aussi (accompagné éventuellement d'un adjectif tel que « vive ») pour désigner une énergie, ainsi que le mot de *puissance*. Mayer écrit ainsi en 1842 que « les plantes absorbent une forme de puissance, la lumière, et en produisent une autre, la différence chimique ». Le terme de *travail* dans son acception scientifique ne fut proposé qu'en 1821 par Coulomb. L'introduction en physique du mot *energy* date de 1807 ; elle est due à Thomas Young, physiologiste, physicien et linguiste anglais (1773-1829) ayant découvert le mécanisme de l'accommodation par l'œil, les interférences, les lois de l'élasticité, et concurrent passionné de Champollion. Mais ce vocable n'avait encore qu'un sens vague. Encore en 1847, lorsque Helmholtz découvrit (section 1.3) la généralité et l'importance de la conservation de l'énergie (sous toutes ses formes), il intitula le livre même où il énonçait *Über die Erhaltung der Kraft*. C'est en 1850 que William Thomson proposa d'employer « energy » au lieu de « force ». William Rankine, ingénieur et physicien écossais (1820-1872) ayant perfectionné la machine à vapeur, parvint enfin en 1853 à formuler en termes modernes la conservation de l'énergie mécanique (potentielle plus cinétique). Le mot « énergie » n'apparaît cependant pas avant 1875 dans la littérature scientifique française.

Une forme mathématique précise a été donnée à la conservation de l'énergie mécanique grâce aux progrès de la *mécanique analytique*. Selon cette discipline, marquée par les mathématiciens Louis de Lagrange (Turin 1736 – Paris 1813) et sir William Hamilton (Dublin 1805-1865), les équations de la dynamique non dissipative sont engendrées à partir du *hamiltonien*, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle considérées comme fonctions des variables de position et de leurs moments conjugués. Pour un système isolé, le hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps, et les équations du mouvement admettent une *intégrale première* égale au hamiltonien lui-même. L'énergie mécanique apparaît donc comme la valeur, qui demeure constante au cours du temps, du hamiltonien. Il pouvait sembler artificiel, au milieu du XIX^{ème} siècle, d'avoir mis sur pied une théorie aussi formelle et aussi élaborée pour ne traiter que de systèmes particuliers, non dissipatifs, somme toute exceptionnels. Nous verrons (section 1.5) que cette même théorie s'est ultérieurement révélée adéquate, de façon inattendue, pour les systèmes les plus généraux, à condition de les décrire en tenant compte de tous leurs degrés de liberté microscopiques.

1.2. Premières études sur la chaleur

Il n'a été question dans ce qui précède que de phénomènes purement mécaniques, sans production ni absorption de chaleur. L'étude des phénomènes calorifiques commence par les premières mesures de *calorimétrie* dues à Pierre Simon de Laplace, astronome, mathématicien et physicien (Beaumont-en-Auge 1749 – Paris 1827), et à Antoine Laurent de Lavoisier (Paris 1743-1794) qui déterminèrent en 1782-84 une série de chaleurs spécifiques et de chaleurs de réaction.

L'étape suivante est marquée par Benjamin Thompson, aventurier et officier américain (1753 – Auteuil 1814) devenu ministre de la guerre en Bavière sous le nom de comte Rumford. Après avoir perfectionné le calorimètre, il mesura entre 1798 et 1804 la quantité de chaleur produite lors du forage de canons et comprit qu'elle devait être proportionnelle au travail fourni.

Inversement, divers inventeurs avaient déjà réussi à extraire empiriquement une « force motrice » à partir de chaleur. Denis Papin, après avoir imaginé sa célèbre « marmite », ancêtre de l'autoclave, fit des tentatives dans ce sens lors de son exil en Allemagne et en Angleterre après la révocation de l'édit de Nantes ; il parvint à construire en 1707 à Kassel le premier bateau à vapeur, qui fut malheureusement détruit par les bateliers lors de ses essais, et il mourut dans la misère (Blois 1647 – Londres 1714). Les mécaniciens anglais Thomas Savery et Thomas Newcomen mirent au point entre 1689 et 1705 les premières machines à feu, utilisables mais dont le rendement n'était que de 1%. James Watt, mécanicien écossais (1736-1819) chargé par l'Université de Glasgow de réparer un modèle réduit de démonstration d'une machine de Newcomen, découvrit que celle-ci pouvait être considérablement perfectionnée. Il breveta en 1769 la première véritable *machine à vapeur*, et y apporta par la suite de multiples améliorations.

Toutes ces expériences et réalisations s'interprètent aujourd'hui comme des transformations en chaleur d'une énergie mécanique ou chimique, ou inversement. Pourtant, à l'époque, en l'absence du concept d'énergie, on considérait généralement la chaleur comme l'un des quatre « fluides impondérables », appelé *calorique*, à côté de la lumière, de l'électricité et du magnétisme. Ce calorique pouvait imprégner les corps matériels pesants et se *conservait* lors des transformations de ceux-ci. Une telle conception du calorique en tant que fluide conservé était encore répandue jusque vers 1840, malgré les expériences de Rumford et malgré la généralisation des machines à vapeur. Afin de progresser, il fallait explorer mieux les propriétés de la chaleur et comprendre sa nature. L'histoire de cette quête, difficile, qui s'étendit tout au long du XIX^{ème} siècle, fait l'objet du passionnant ouvrage de S. G. Brush, *The kind of motion we call heat* (North Holland, 1976, deux volumes). Nous la résumons dans les deux sections qui suivent.

1.3. Naissance de la thermodynamique

Au cours de la première moitié du XIX^{ème} siècle, les découvertes se sont succédé dans un ordre opposé à celui que nous estimons actuellement logique ou pédagogique. C'est ainsi qu'avec les études de Fourier sur la *propagation de la chaleur*, la notion de flux d'énergie, qui sous-tend la dynamique des processus irréversibles, est apparue une cinquantaine d'années avant celle d'énergie, pourtant plus simple puisqu'elle concerne l'équilibre. Il est vrai que, pour ce problème, le flux d'énergie pouvait encore s'interpréter comme un flux de calorique. Joseph Fourier (1768-1830), l'un des premiers professeurs à l'École Polytechnique avec Monge et Lagrange, participa à l'expédition d'Égypte, puis devint préfet de l'Isère sous l'Empire tout en consacrant ses loisirs aux mathématiques et à la physique. A travers un impressionnant ensemble de travaux, il résolut le « problème de la chaleur » qui avait été mis au concours par l'Académie des Sciences. Il parvint d'abord à trouver (section 2.3) les équations du problème (1811), inventa les séries dites de Fourier (1812) pour tenter de les résoudre, puis les intégrales de Fourier qui lui permirent enfin d'aboutir à une solution complète ; il publia ses résultats quelques années plus tard (1822) sous le titre de *Théorie analytique de la chaleur*.

De même, la découverte de ce que nous appelons le « *deuxième* » principe de la thermodynamique précéda d'une vingtaine d'années celle du « *premier* ». On la doit à Sadi Carnot (Paris 1796-1832) qui, inspiré par l'étude théorique des machines à vapeur, énonça en 1824 sous une forme déjà claire ce principe dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance*. Cette publication constitue l'acte fondateur de la thermodynamique. Carnot donna en particulier une expression correcte pour le rendement des machines à vapeur, rapport du travail fourni à la chaleur reçue de la source chaude au cours d'un cycle. Mais il n'écrivit pas le bilan global, ne se souciant pas de la chaleur cédée à la source froide. Plus ou moins consciemment, il adhérait encore alors à la théorie du calorique, fluide qui s'écoulerait sans perte de la source chaude vers la source froide, comme l'eau qui met en mouvement une roue de moulin. Cependant, quelques années plus tard, Carnot comprit que le travail produit était soustrait à ce flux de chaleur, et prit ainsi conscience de l'équivalence entre travail et chaleur. Malheureusement, après sa mort lors de l'épidémie de choléra de 1832, la majeure partie de ses meubles et de ses papiers fut détruite par mesure d'hygiène – bien que l'on se soit interrogé plus tard sur la véritable cause de son décès. Ses écrits où il avait pressenti le premier principe ne furent découverts et publiés qu'un demi-siècle plus tard.

L'établissement définitif de l'équivalence entre travail et chaleur, l'énoncé du premier principe et l'introduction de la notion d'énergie ont requis la convergence d'idées issues de domaines divers. En témoigne la variété des préoccupations de la dizaine de savants qui, plus ou moins en parallèle, ont clarifié ces questions entre 1840 et 1850. Julius Robert von Mayer, médecin allemand de la marine (1814-1878), auteur d'expériences quantitatives sur le métabolisme humain, énonça en 1842 le *principe d'équivalence* ; il comprit aussi en 1845 que l'assimilation chlorophyllienne réalise une transformation d'énergie lumineuse en énergie chimique. L'équivalence du travail et de la chaleur fut établie avec plus de précision par James Prescott Joule, riche brasseur anglais (1815-1889), physicien amateur, grâce à ses célèbres expériences de 1843-1847 où une chute de poids chauffe l'eau d'un calorimètre grâce au frottement dans l'eau d'une roue à ailettes entraînée par un poids.

Le *concept d'énergie* fut introduit en toute généralité en 1847 par Hermann von Helmholtz, médecin prussien (1821-1892) qui se consacra très tôt à la physique et apporta des contributions majeures à la plupart des branches de celle-ci. C'est lui qui émit l'idée que les transformations de la matière traduisent des changements de nature de l'énergie, et que la valeur totale de celle-ci reste conservée. Un apport de chaleur ou de travail à un système aboutit à un accroissement équivalent de son énergie interne.

Helmoltz avait été précédé par Ludvig Colding, penseur danois (1815-1888) animé par des motivations métaphysiques, qui imaginait déjà en 1843 l'énergie comme l'essence des choses, une entité sous-jacente à la matière. On peut considérer comme héritiers de Colding les *énergétistes* tels que Wilhelm Ostwald, chimiste allemand (1853-1932) célèbre pour ses travaux sur l'électrolyse et la catalyse, tenants d'une philosophie teintée de mysticisme largement répandue vers la fin du XIX^{ème} siècle. Leur conception de l'énergie, substance continue, créée et indestructible, devait freiner le développement de la théorie cinétique et de l'atomisme, dont les partisans comme Boltzmann estimaient au contraire que la réalité ultime était faite de particules et non d'énergie (section 1.5).

Parmi ceux qui ont contribué à l'établissement du premier principe, on trouve aussi des ingénieurs ayant participé aux progrès des machines à vapeur, Rankine dont nous avons parlé à la section 1.1, Marc Seguin (Annonay 1786-1875) et Gustave Hirn (Colmar 1815-1890). On trouve enfin un chimiste allemand, Justus von Liebig (1803-1873), et un électrochimiste anglais, William R. Grove (1811-1896), inventeur en 1839 de la pile à hydrogène. Ce sont les travaux de ce dernier, ainsi que la découverte en 1841 de l'effet Joule, qui ont permis d'étendre le concept d'énergie, depuis la mécanique et la chaleur, vers les phénomènes *chimiques* et *électriques*. Une quarantaine d'années plus tard, Helmholtz devait relier la force électromotrice d'une pile à son énergie libre de réaction.

L'édifice de la thermodynamique des états d'équilibre fut achevé au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Après qu'Emile Clapeyron (Paris 1799-1864) eut précisé et développé les

idées de Carnot, en définissant notamment la notion de réversibilité (1843), Rudolf Clausius, physicien allemand (1822-1888), introduisit en 1854 une grandeur nouvelle, qu'il baptisa *entropie* en 1865 et qui permettait de donner au deuxième principe une forme plus concise quoique plus abstraite. Son concurrent britannique, William Thomson (1824-1907) qui devait devenir lord Kelvin en 1892, avait introduit en 1848 la *température absolue*. Dans les dernières décennies du siècle, les *potentiels thermodynamiques* comme l'énergie libre ou l'enthalpie, fonctions apparentées à la fois à l'énergie interne et à l'entropie, furent bâtis et utilisés par Helmholtz, par son élève Max Planck (1858-1947) et par l'américain Josiah Willard Gibbs (New Haven 1839-1903). En fait, la même idée avait déjà été exploitée par François Massieu [ingénieur des mines, économiste, physicien et mathématicien (1832-1896)] afin de déterminer la chaleur spécifique des fluides à partir de leur équation d'état en vue d'application aux machines à vapeur ; mais son travail publié en 1870 fut méconnu en raison de la guerre franco-allemande.

Selon la formulation moderne de la thermodynamique due à Laszlo Tisza et Herbert Callen (1960), toutes les propriétés d'équilibre d'un système sont caractérisées par l'expression de son entropie en fonction de ses variables conservatives, comme l'énergie et le nombre de particules constitutives de chaque type. Selon l'équation (1) ci-dessous, l'inverse de la température absolue apparaît alors comme variable conjuguée de l'énergie.

1.4. La thermodynamique des processus irréversibles

La thermodynamique des processus dissipatifs hors d'équilibre, initiée par Fourier, avait elle aussi progressé au cours de la première moitié du XIX^{ème} siècle. A la loi de Fourier énonçant que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température (gradient qui caractérise l'écart à l'équilibre) avait succédé toute une série de lois empiriques du même type : loi d'Ohm (1827) pour la conduction électrique, lois de Seebeck (1821) et de Peltier (1834) pour les effets thermoélectriques, loi de Fick (1855) pour la diffusion de soluté dans un solvant [Adolf Fick, physiologiste allemand], loi de Darcy (1856) pour l'écoulement à travers un milieu poreux [Henri Darcy, ingénieur au Service des eaux de Dijon]. L'étude de la cinétique chimique s'appuie de même sur la proportionnalité entre le taux de réaction et l'affinité chimique, grandeur caractérisant l'écart à l'équilibre et construite à partir des potentiels chimiques des divers constituants. (Le vocabulaire reste encore aujourd'hui source de confusion ici, puisqu'un potentiel chimique ressemble à une température, et non à un potentiel thermodynamique ou à une énergie potentielle.)

En ce qui concerne la dynamique des fluides, Newton avait déjà introduit une loi définissant la viscosité. Les équations complètes furent écrites en 1825 par Henri Navier, ingénieur des Ponts et Chaussées (Dijon 1785 – Paris 1836), s'appuyant sur des rudiments de théorie cinétique. Cependant, l'atomisme étant au cours des années suivantes rejeté par la plupart des savants au fur et à mesure que se développait la physique du *continu*, il fallut attendre 1845 pour que la communauté fût convaincue par les arguments de sir George Gabriel Stokes (Irlande 1819 – Cambridge 1903) du bien-fondé des équations dites aujourd'hui de Navier–Stokes.

Tous ces phénomènes d'apparences diverses n'ont pu être englobés dans un cadre cohérent qu'à la suite des travaux effectués en 1931 par De Donder, chimiste belge, et par Lars Onsager (Oslo 1903 – Miami 1976), physicien théoricien. Ainsi est née la thermodynamique des processus irréversibles, théorie systématique et unifiée régissant le *déroulement dans le temps* de ces processus. Malgré son importance, cette discipline n'est encore guère enseignée que de façon fragmentaire (voir cependant R. Balian, *op. cit.* Tome II, chap. 14). Nous en rappellerons ci-dessous à la section 2.3 les principes fondamentaux, qui ne doivent pas être confondus avec ceux de la thermodynamique usuelle. Celle-ci ne traite en effet que de l'état initial d'un processus et de son état final, tous deux en quasi-équilibre, et non de la manière dont le système passe de l'un à l'autre.

1.5. L'apport de la physique statistique

Aussi bien la thermodynamique traditionnelle que celle des processus irréversibles souffrent d'un défaut. Des concepts fondamentaux, chaleur, température, énergie, entropie, y présentent un caractère abstrait difficile à appréhender, même si la théorie permet leur manipulation mathématique en conduisant à des prévisions en accord avec l'expérience. Ce fut un apport majeur d'une nouvelle science, la physique statistique, que de clarifier la signification de ces concepts en leur donnant à l'échelle microscopique une interprétation *mécaniste* et *probabiliste*.

En ce qui concerne les gaz, ce progrès fut effectué grâce à la *théorie cinétique*, principalement élaborée par James Clerk Maxwell (Edimbourg 1831 – Cambridge 1879) et par Ludwig Boltzmann (Vienne 1844 – Trieste 1906). La description d'un gaz en tant qu'assemblée de très nombreuses molécules, n'interagissant que lors de collisions très brèves, permet d'interpréter dans un état macroscopique d'équilibre ou voisin de l'équilibre la densité comme un nombre moyen de molécules par unité de volume, la pression comme une force moyenne exercée sur une paroi sous l'effet des collisions de molécules sur cette paroi, l'entropie comme une mesure du désordre régnant à l'échelle microscopique. L'énergie interne s'identifie à l'énergie cinétique totale des molécules, le travail fourni par un piston à une énergie mécanique communiquée sous l'effet de collisions, un apport de chaleur à la transmission aux molécules d'une énergie cinétique désordonnée. Pour les matériaux plus condensés que les gaz, l'énergie d'interaction à l'échelle microscopique entre particules constitutives n'est plus négligeable comparée à leur énergie cinétique, et l'énergie macroscopique totale s'identifie à l'énergie mécanique microscopique, somme des énergies cinétique et d'interaction des particules.

Le *premier principe* de la thermodynamique traduit donc la constance au cours du temps de l'*énergie microscopique*, grandeur qui a une expression simple en fonction des positions et vitesses des particules constituant le matériau. La théorie cinétique a ainsi abouti à une importante simplification et à un retour en arrière surprenant : en passant à l'échelle microscopique, on n'a plus besoin que de concepts de mécanique analytique ; l'énergie *totale* s'identifie à la valeur, conservée, du hamiltonien microscopique.

Le *deuxième principe* exprime que l'état d'équilibre final d'un système est à l'échelle microscopique *le plus désordonné* parmi ceux que le système puisse atteindre, ce désordre étant mesuré par l'entropie, grandeur statistique. La notion de chaleur, que l'on avait mis si longtemps à dégager et qui était indispensable pour exprimer à notre échelle la conservation de l'énergie, s'évanouit à l'échelle microscopique, où la chaleur n'est qu'une partie (désordonnée) de l'énergie mécanique totale.

Cette explication des concepts et principes de la thermodynamique paraît aujourd'hui naturelle, mais il faut souligner qu'elle ne s'est imposée qu'au XX^{ème} siècle. Malgré sa notoriété, Boltzmann allait à contre-courant de la science de son temps et dut lutter rudement pour défendre ses idées. En effet, la physique du continu triomphait alors avec la thermodynamique, l'électromagnétisme, l'optique ou la dynamique des fluides. L'atomisme apparaissait comme une hypothèse hasardeuse dénuée de fondement expérimental : les observations décisives de Jean Perrin datent de 1908, et même des chimistes comme Berthelot refusaient de considérer une réaction chimique comme un réarrangement d'atomes en molécules.

Au cours du XX^{ème} siècle, le développement de la *physique statistique quantique* permit de généraliser, d'abord aux propriétés énergétiques du rayonnement électromagnétique (Planck, 1900 ; Einstein, 1904) puis aux solides et à tout système matériel, les idées initiées par la théorie cinétique des gaz. En conséquence, les bases de la thermodynamique, autrefois érigées en principes fondamentaux autonomes, n'apparaissent plus aujourd'hui que comme de simples conséquences à notre échelle des lois, elles-mêmes simples, de la microphysique. En principe, les propriétés macroscopiques des processus dynamiques hors d'équilibre et les lois de comportement des divers matériaux découlent aussi de la physique microscopique. Les constituants élémentaires d'un matériau

sont si nombreux qu'ils ne peuvent être étudiés que par des méthodes statistiques ; cependant, ce grand nombre permet d'effectuer à notre échelle des prévisions quasi certaines, ce qui confère à la théorie son caractère déterministe malgré les probabilités sous-jacentes. Il émerge ainsi à notre échelle des propriétés, déterminisme, continuité, irréversibilité, transitions de phase, qui diffèrent *qualitativement* des comportements microscopiques.

Ces progrès majeurs constituent une réussite conceptuelle spectaculaire du *réductionnisme* : grâce à l'application de la mécanique quantique, théorie microscopique, à des systèmes comportant un très grand nombre de particules et à l'emploi de méthodes statistiques, le macroscopique, complexe et varié, s'est ramené au microscopique, simple et unifié, donc plus fondamental. Ceci est particulièrement net pour l'énergie, dont les multiples formes que nous percevons ne sont que des reflets d'une même réalité sous-jacente. Cependant, même si nous savons désormais que les sciences macroscopiques découlent de la microphysique, elles ne sont pas pour autant devenues caduques. En effet, en raison de l'*émergence* de phénomènes a priori inattendus lorsqu'on passe d'une échelle à l'autre, des études de physique à notre échelle restent toujours indispensables : elles seules permettent de découvrir et d'explorer de tels phénomènes, même si ces derniers peuvent a posteriori trouver leur explication dans la physique microscopique. De plus, celle-ci fait intervenir un très grand nombre de degrés de liberté, dont la manipulation est dans la pratique souvent irréalisable. En particulier, pour les applications de la physique à l'énergétique, une approche macroscopique suffit à la plupart des besoins.

1.6. L'apport de la mécanique quantique, de la relativité et de la physique des particules

Même si les progrès de la physique au XX^{ème} siècle ont porté principalement sur des aspects microscopiques apparemment éloignés de notre expérience quotidienne, ils ont apporté des éclairages nouveaux sur le concept d'énergie, qui s'est ainsi enrichi et précisé. Par ailleurs, la physique nouvelle a, dans le domaine de l'énergétique, donné naissance à des objets technologiques aussi divers et novateurs que les *réacteurs nucléaires* ou les *piles photovoltaïques*.

Nous avons rappelé ci-dessus les origines de la mécanique quantique : afin d'expliquer la loi de Planck, qui régit la manière dont l'énergie se distribue selon les fréquences dans un rayonnement comme celui du Soleil, il faut quantifier le rayonnement, c'est-à-dire le représenter comme une assemblée de particules, les photons. En conséquence, l'énergie d'un rayonnement ne peut prendre que des valeurs discrètes, égales à la somme des énergies des photons qui le constituent. Les progrès ultérieurs de la physique quantique ont montré que la *quantification de l'énergie* est un phénomène général. L'énergie de tout système fini ne varie pas de façon continue ; elle ne peut prendre que certaines valeurs discrètes bien définies. Cette propriété contraste avec notre expérience courante, qui semble indiquer que l'énergie est une grandeur continue. Cependant, à notre échelle, les valeurs permises pour l'énergie d'un système comportant un grand nombre de constituants élémentaires sont certes discrètes, mais si denses que leur caractère discontinu est invisible.

La microphysique a fait aussi découvrir d'autres aspects de l'énergie, associés à l'évolution au cours du temps. A l'échelle microscopique, la dynamique d'un système est engendrée, en mécanique quantique comme en mécanique analytique (section 1.1), par un hamiltonien, fonction des positions et moments des constituants élémentaires égale à la somme de leurs énergies cinétique et d'interaction. (Le potentiel d'interaction, qui figure ainsi directement dans le lagrangien ou le hamiltonien, présente un caractère plus fondamental que les forces, grandeurs qui en découlent.) En termes de particules élémentaires, il n'y a ni dissipation, ni irréversibilité, ni chaleur : ces notions émergent par passage à l'échelle macroscopique. L'avènement de la mécanique quantique n'a guère modifié ces principes, mais nous devons désormais considérer les positions, moments et autres grandeurs dynamiques non plus comme des variables qui commutent mais comme des opérateurs. Tout objet physique, décrit par un opérateur, se comporte comme une variable aléatoire, qui peut présenter des fluctuations autour de sa valeur moyenne. L'énergie s'interprète alors comme *valeur moyenne de l'opérateur hamiltonien H*.

Les fluctuations statistiques relatives de celui-ci sont faibles pour un système macroscopique, de sorte que le caractère probabiliste de l'énergie est masqué à notre échelle.

De plus, à un instant donné, l'état d'un système quantique défini aussi bien que possible est représenté par une fonction d'onde Ψ ; l'évolution de celle-ci se décrit mathématiquement par l'équation de Schrödinger (1926), $i\hbar \partial\Psi / \partial t = H\Psi$, où l'opérateur hamiltonien agit sur la fonction d'onde et où $h = 2\pi \hbar = 6,6 \times 10^{-34}$ Js est la constante de Planck. Dans le cadre de la dynamique, *l'énergie et le temps* apparaissent ainsi comme des *grandeurs conjuguées* (alors que, comme nous l'avons vu à la section 1.3, c'est l'énergie et l'inverse de la température qui doivent en thermodynamique être considérées comme conjuguées). Cette correspondance entre temps et énergie, issue de l'équation de Schrödinger, fait intervenir la constante de Planck, les variables conjuguées étant en toute rigueur E et t/\hbar . Elle se voit encore plus clairement lorsque l'on considère un état quantique stationnaire, décrit par une fonction d'onde dont seule la phase varie au cours du temps, en oscillant avec une fréquence ν ; le hamiltonien prend alors une valeur bien définie E . Cette énergie E est alors reliée à la fréquence ν (ou à la période de l'onde) par la relation $E=h\nu$ de Louis de Broglie (1924).

Une autre situation où temps et énergie sont associés est celle des états métastables en physique atomique (atomes optiquement excités) ou en physique des particules (noyaux radioactifs). De tels états, qui ont une certaine durée de vie τ , sont représentés par des fonctions d'onde décroissant au cours du temps selon la loi exponentielle $\exp[-t/\tau]$. Leur énergie est mal définie et on montre que sa fluctuation statistique Γ est reliée au temps de vie par la relation $\Gamma = \hbar/2\tau$.

La dualité entre énergie et temps, ainsi que la conservation de l'énergie, entrent en fait dans un cadre plus profond et général. Selon un théorème établi par la mathématicienne Emmy Noether (Erlangen 1882 – Bryn Mawr 1935), toute *invariance* des lois de la nature sous l'effet des transformations d'un certain groupe a pour conséquence la *conservation* au cours du temps de certaines grandeurs, qui sont les valeurs moyennes des générateurs infinitésimaux de ce groupe. Par exemple, les trois composantes du moment total constituent en mécanique quantique des opérateurs, générateurs des translations ; l'invariance des lois physiques par translation implique la conservation de la quantité du mouvement, valeur moyenne du moment total (section 1.1). De même, l'invariance par rotation entraîne la conservation du moment cinétique. La conservation de l'énergie, elle, traduit *l'invariance des lois par changement d'origine du temps*. En effet, selon l'équation de Schrödinger, la variation entre les temps t et $t + dt$ de la fonction d'onde Ψ est $\Psi(t + dt) - \Psi(t) = H\Psi dt / i\hbar$, de sorte que l'opérateur hamiltonien est, au facteur $1/i\hbar$ près, le générateur des translations dans le temps. L'invariance par translation dans le temps, propriété très intuitive, implique la loi de conservation de l'énergie, qui l'est beaucoup moins, comme l'a montré la difficulté de son élaboration.

La description d'un état quantique par une fonction d'onde ne convient que pour des objets microscopiques, qui sont aussi contrôlables que ne le permet le caractère probabiliste imposé par la physique quantique. L'introduction en 1927 par Lev Davidovitch Landau et Johann (John) von Neumann de la notion de mélange statistique, forme que prend la notion d'état quantique pour les systèmes macroscopiques, permet de préciser les idées de Boltzmann sur l'entropie en tant que mesure du désordre ; von Neumann écrivit en effet son expression générale en termes de la description microscopique, probabiliste et quantique, des systèmes. Cette expression devait inspirer les ingénieurs et mathématiciens Claude Shannon et Warren Weaver en 1948, lorsqu'ils créèrent la théorie de la communication basée sur la mesure des quantités *d'information*. En retour, Léon Brillouin fut conduit en 1950 à établir l'équivalence entre l'entropie et la mesure du manque d'information microscopique sur les systèmes que considère la thermodynamique (voir R. Balian, *Entropie, information : un concept protéiforme*, Université de tous les savoirs, vol. 4, pp. 947-959, Odile Jacob 2001).

L'existence de fluctuations quantiques a permis de prévoir certains phénomènes exotiques, qui ont pu être observés. Ainsi, l'effet Casimir (1948) est associé à un concept nouveau, celui *d'énergie du*

vide. Dans une région vide de l'espace délimitée par des parois non chargées, le champ électromagnétique est nul, mais seulement en moyenne ; il présente des fluctuations autour de zéro. Etant donné qu'un champ possède une énergie qui est proportionnelle à son carré, ses fluctuations se traduisent par une valeur non nulle pour cette énergie, même dans une région vide. Cette valeur dépend de la position et de la forme des parois. En conséquence, les parois se trouvent soumises à des forces exercées par le vide, que l'on a pu mesurer.

La *relativité* a, comme la physique quantique, apporté plusieurs changements de perspective sur le concept d'énergie. La relativité restreinte (1905) obligea à considérer, pour une particule ponctuelle, les coordonnées de position et le temps comme des variables pouvant se combiner entre elles lorsqu'on change de repère ; elles forment les quatre composantes d'une seule entité, un quadrivecteur. De même, l'énergie se combine aux trois coordonnées du vecteur quantité de mouvement (ou *moment*) pour former un quadrivecteur, de sorte qu'énergie et moment sont des grandeurs de nature similaire. La dualité entre temps et énergie apparaît ainsi sous un jour nouveau, en parallèle avec la dualité entre position et moment. De plus, la relativité fixe la constante additive arbitraire qui pouvait être incluse dans la définition pré-relativiste de l'énergie.

Par ailleurs, la célèbre formule $E=mc^2$ d'Einstein mit en évidence une équivalence entre *masse et énergie*. Avec la relativité générale, la densité d'énergie prit un aspect géométrique puisque cette grandeur s'interpréta comme l'une des composantes d'un tenseur, relié par les équations d'Einstein à la *courbure de l'espace-temps*. Enfin, dans ce même cadre, l'énergie du vide, définie sans constante additive, a des conséquences cosmologiques puisqu'elle implique que le vide se comporte comme s'il avait une masse.

La science du XX^{ème} siècle a aussi été marquée par l'apparition de la *physique des particules*, molécules et atomes, puis électrons et noyaux, puis encore constituants de ces derniers à des échelles de plus en plus petites. Elle a eu pour origine la découverte de la *radioactivité* (Henri Becquerel, 1896 ; Pierre et Marie Curie, 1898), dont l'étude provoqua pendant quelques années une *crise*. Ayant observé qu'une masse très faible de radium dégageait un flux d'énergie considérable, transporté par le rayonnement émis et recueilli sous forme de chaleur, Marie Curie s'interrogea avec d'autres sur l'origine de cette énergie. Elle se demanda même si le phénomène de radioactivité ne violait pas la conservation de l'énergie, qui était déjà érigée en dogme. Ces doutes étaient légitimes car les énergies en jeu étaient incomparablement supérieures à celles que l'on connaissait jusque là, et leur production semblait ne pas décroître au cours du temps. Le problème fut résolu par Rutherford et Soddy avec la découverte des mécanismes de la radioactivité et celle des temps de vie, en relation avec des mesures calorimétriques.

L'observation de trois types de rayonnement, α , β et γ , puis l'analyse des rayons cosmiques et surtout le développement des accélérateurs ont progressivement conduit à l'élaboration de la théorie des particules élémentaires et de leurs interactions. Au cours du dernier demi-siècle, cette étude de la matière à des échelles infra-nucléaires a permis de distinguer *quatre interactions élémentaires*. Cette classification microscopique se reflète à notre échelle par des propriétés fort différentes. Elle présente une importance capitale pour la compréhension des problèmes énergétiques. Nous y reviendrons à la section 2.4.

2. Conséquences énergétiques des principes fondamentaux

L'historique qui précède a mis en évidence quelques uns des apports réciproques de la technologie et de la science dans le domaine de l'énergie. Aujourd'hui, on n'attend plus guère de progrès conceptuels suggérés par l'énergétique, mais à l'inverse celle-ci continuera toujours à reposer sur les données scientifiques. Nous passons ici en revue quatre catégories d'idées sur lesquelles s'appuient toutes les applications pratiques de l'énergie : le premier et le deuxième principe, la thermodynamique hors d'équilibre et la classification issue de la microphysique. Comme tous les

autres grands principes de la physique, ces acquis de la science fournissent des *contraintes* qui limitent les activités humaines.

2.1. Premier principe

L'*énergie* d'un système *isolé* reste *constante* au cours du temps (section 1.3). Il ne peut se créer ni se détruire d'énergie, et il est impropre de parler comme on le fait couramment de « production » ou de « consommation » d'énergie. Dans tous les cas, il s'agit de *changement de forme*, ou de *transfert* d'un système à un autre.

2.1.1. Transformations de l'énergie

La vie courante en offre de nombreux *exemples*. « Consommer » de l'énergie électrique pour faire fonctionner un *téléviseur* signifie la transformer en énergie lumineuse émise par l'écran (en passant par l'énergie cinétique des électrons issus de la cathode), en énergie acoustique diffusée dans l'air ambiant (par l'intermédiaire des énergies cinétique et potentielle de la membrane du haut-parleur) et surtout en chaleur inutile (principalement par effet Joule).

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

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

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

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

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

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

2.1.2. Unités

Ces bilans ne peuvent être effectués de façon quantitative que si toutes les formes d'énergie sont mesurées avec la même unité. En principe, on ne devrait utiliser que le *joule*, unité légale du système international (SI). Dans la pratique, on continue à employer d'autres unités que la tradition a imposées au gré des besoins. Le *kilowatt-heure* (1 kWh = 3600 kJ) est adapté aux usages domestiques, en particulier à la fourniture d'électricité ; afin de faciliter les comparaisons, le gaz lui aussi n'est plus facturé en France en m³, mais en kWh. Il serait souhaitable, pour permettre au public de mieux apprécier le prix de l'essence et le pouvoir énergétique de ses diverses variétés, de facturer également celle-ci non au litre mais au kWh (la combustion de 1 litre dégage environ 12 kWh de chaleur).

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

La microphysique a besoin d'unités d'énergie beaucoup plus petites. L'unité adaptée aux phénomènes de physique atomique ou de physique des solides est l'*électron-volt*, énergie acquise par un électron lorsque son potentiel électrique diminue de 1 V ; la charge d'une mole d'électrons étant de 96 500 C, on trouve en divisant par le nombre d'Avogadro $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ que 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J. En physique nucléaire et en physique des particules, on utilise les multiples de 10³ en 10³ de l'électron-volt : keV, MeV, GeV, TeV. La mécanique quantique associe *fréquences* et énergies selon la relation $E = h\nu$; un photon au milieu du visible ($\lambda = 0,6 \mu\text{m}$) a une fréquence de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, donc une énergie de 2,1 eV. La relation d'Einstein $E = mc^2$ fait correspondre à la *masse* de l'électron une énergie de 0,511 MeV, ou encore à une masse de 1 μg une énergie de 25 kWh.

Enfin, les économistes et les médias ont malheureusement imposé une unité scientifiquement aberrante, la *tonne d'équivalent pétrole* (tep ou toe en américain) ainsi que la tonne d'équivalent charbon (1 tec = 0,7 tep). Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par combustion d'une tonne de pétrole, soit 1 tep = 12 MWh ; ce chiffre est approximatif car il dépend de la qualité du pétrole. De plus, lorsqu'on traduit en tep de l'énergie électrique, on tient compte du rendement des centrales thermiques au fioul (38%), de sorte que 1 MWh électrique vaut par convention non 0,1 mais 0,2 tep environ. La nécessité d'utiliser tous ces facteurs de conversion dans la discussion des problèmes énergétiques et dans la comparaison entre formes d'énergie différentes nuit souvent à la clarté du débat.

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

2.2. Deuxième principe

L'entropie thermodynamique est une grandeur additive que l'on peut associer à chaque état voisin de l'équilibre d'un système. Le deuxième principe peut s'énoncer en exprimant que, pour tout processus spontané, l'*entropie* d'un système *isolé* est, dans l'état final, *supérieure* (ou égale) à sa valeur dans l'état initial (section 1.3). A l'échelle microscopique, cette propriété traduit une *augmentation du désordre* (section 1.5). De manière équivalente, elle signifie que l'évolution transfère une information macroscopique sur l'état initial du système vers des degrés de liberté microscopiques inaccessibles, de sorte qu'elle entraîne une *perte d'information* (section 1.6). Ces interprétations sont précisées par l'expression $S = k \ln W$ de l'entropie, qui la relie au nombre W de configurations microscopiques équivalentes en ce qui concerne l'état macroscopique considéré.

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

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

2.2.1. Irréversibilité, dissipation d'entropie et dégradation de l'énergie

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

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

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

Le mélange (à volume total constant) de deux gaz comportant respectivement M molécules d'un premier type et N molécules d'un second type fait croître le désordre, d'une quantité mesurée par

l'entropie de mélange $S = k \ln[(M + N)! / M! N!]$. Ici, il y a dissipation sans phénomène énergétique.

Cependant, la notion de désordre microscopique n'est pas absolue ; elle dépend de nos possibilités d'observation et d'action par des moyens macroscopiques associés à l'information que nous possédons sur le système. Ainsi, le plus souvent, les réactions chimiques libèrent de l'énergie *chimique* sous forme de chaleur, notamment lorsqu'on utilise des carburants dans les véhicules, les centrales thermiques ou le chauffage domestique. Il faut alors considérer l'énergie chimique (de même que l'énergie nucléaire) comme dégradée. Mais ce n'est pas toujours le cas, car on sait dans certaines circonstances (accumulateurs ou piles) convertir directement et quasi réversiblement de l'énergie chimique en énergie électrique, ce qui conduit alors à considérer l'énergie chimique comme noble.

2.2.2. Bilans d'énergie et d'entropie

Bien des entreprises humaines visent à contrecarrer la tendance naturelle vers le désordre qu'exprime le deuxième principe. Il est évidemment impossible d'y parvenir si le système d'intérêt est *isolé*. C'est pourquoi il faut coupler ce système avec des *sources*, autres systèmes avec lesquels il peut interagir. Son entropie peut ainsi décroître dès lors que les sources sont le siège d'un accroissement au moins égal d'entropie. On exploite de la sorte la tendance *globale* du système composite à évoluer vers un état d'entropie plus grande, afin de faire *localement décroître* l'entropie du sous-système d'intérêt.

Si par exemple on souhaite refroidir un système A, il doit pour satisfaire au premier principe céder une certaine quantité de chaleur $\delta Q = \delta U_B = -\delta U_A > 0$ à une source B. Ceci implique que son entropie décroisse ($\delta S_A < 0$) en même temps que son énergie, en vertu de la définition

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial U} \quad (1)$$

de la température absolue. (On suppose fixées les variables extensives autres que l'énergie, telles que le volume et le nombre de particules.) Il est donc nécessaire que, selon le deuxième principe, l'entropie de B croisse au cours du processus d'une quantité δS_B supérieure à $|\delta S_A|$, ce qui implique

$$0 < \delta S_A + \delta S_B = \frac{\delta U_A}{T_A} + \frac{\delta U_B}{T_B} = \delta Q \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right),$$

et par suite $T_A > T_B$. Le système A ne peut donc se *refroidir* que s'il a une *température plus élevée* que celle de la source B, énoncé de Clausius du deuxième principe.

Cet exemple montre l'utilité dans les questions d'énergétique d'un *double bilan* traduisant mathématiquement les deux principes. Etant donné un ensemble de sous-systèmes interagissant les uns avec les autres, la *variation d'énergie* de chacun d'eux doit être *égale à l'énergie qu'il reçoit*, tandis que sa *variation d'entropie* doit être *supérieure à l'entropie qu'il reçoit*. Ces égalités et inégalités fournissent des contraintes sur les processus réalisables.

Ici encore, la vie courante fournit de nombreuses illustrations. Si une cuisine contenant un *réfrigérateur* était isolée de l'extérieur, il serait impossible de refroidir l'intérieur A du réfrigérateur par transfert de chaleur à l'air B de la cuisine, car la transformation inverse, qui se produit spontanément, est irréversible ; mathématiquement, la conservation de l'énergie totale impliquerait pour ce processus une décroissance de l'entropie puisque $T_A < T_B$. On ne peut faire fonctionner le réfrigérateur, en abaissant son énergie intérieure de $|\delta U_A|$, que grâce à un apport δW d'énergie fournie de l'extérieur sous forme électrique et transformée en énergie mécanique dans le bloc compresseur. Le double bilan, d'énergie et d'entropie, fournit alors :

$$0 < \delta S = \frac{\delta U_B}{T_B} - \frac{|\delta U_A|}{T_A} = \frac{\delta W}{T_B} - |\delta U_A| \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right),$$

ce qui détermine la consommation minimale d'énergie électrique δW de l'appareil. (Un calcul complet, qui fournirait la puissance minimale du réfrigérateur, nécessite la prise en compte du flux de chaleur à travers les parois. La même estimation est valable pour un *climatiseur*.)

Le même bilan s'applique à une *pompe à chaleur*, qui a pour but de transférer de la chaleur depuis l'air extérieur A, froid, vers l'intérieur B d'une habitation afin de la chauffer. Etant donné qu'un tel flux va en sens inverse de celui que prévoit l'énoncé de Clausius, son établissement nécessite la consommation (dans un appareillage analogue à celui d'un réfrigérateur) d'une certaine quantité d'énergie mécanique ou électrique δW , dont la valeur minimale se calcule comme ci-dessus. La quantité d'intérêt est cependant ici la chaleur δU_B cédée à l'habitation, et non celle extraite de la source froide (l'extérieur). Le rendement maximal est ainsi donné par

$$0 < \delta S = \frac{\delta W}{T_A} - \delta U_B \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right),$$

ce qui montre que l'énergie δW consommée par la pompe à chaleur peut être très inférieure à la valeur δU_B que l'on aurait consommée en utilisant par exemple un radiateur électrique : à l'énergie électrique δW utilisée s'est ajoutée la chaleur $|\delta U_A|$ tirée de l'extérieur. On peut imaginer de même, en ne considérant que des sources de chaleur, que l'on souhaite chauffer un local B à l'aide d'une chaudière C à température élevée. Pour une quantité δU_B de chaleur fournie au local, il est possible d'économiser la chaleur $|\delta U_C|$ cédée par cette chaudière en l'utilisant non directement, mais pour faire fonctionner une pompe à chaleur branchée sur l'air extérieur A, à température plus basse ($T_A < T_B < T_C$). La chaudière est alors la source chaude d'un générateur d'électricité alimentant la pompe à chaleur. Le bilan global d'énergie indique que la quantité de chaleur reçue par le local B comprend non seulement la chaleur fournie par la chaudière C, mais aussi celle extraite de l'air extérieur A. Le bilan d'entropie de A, B et C,

$$0 < \delta S = \frac{\delta U_A}{T_A} + \frac{\delta U_B}{T_B} + \frac{\delta U_C}{T_C} = |\delta U_C| \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_C} \right) - \delta U_B \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right),$$

montre que l'on peut espérer pour borne supérieure du rendement global une valeur très supérieure à 1 ; on peut gagner par exemple jusqu'à un facteur 10 lorsque $T_A = 0^\circ\text{C}$, $T_B = 20^\circ\text{C}$, $T_C = 600^\circ\text{C}$ grâce à cette utilisation indirecte de la chaudière.

Inversement, la production d'une énergie mécanique ou électrique δW par un *moteur thermique* ou une turbine nécessite évidemment une source A d'énergie, la source chaude dont l'énergie U_A doit diminuer. Mais cette diminution implique aussi une diminution ($\delta S_A < 0$) de l'entropie S_A , diminution qui doit être compensée par la croissance de l'entropie S_B d'un autre sous-système B. Ce dernier n'est autre que la *source froide* du moteur, qui est en réalité une *source de neguentropie* nécessaire à la satisfaction du double bilan ; la chaleur que cette source reçoit doit faire croître S_B d'une quantité δS_B supérieure à $|\delta S_A|$, ce qui implique

$$0 < \frac{\delta U_B}{T_B} - \frac{|\delta U_A|}{T_A} = |\delta U_A| \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) - \frac{\delta W}{T_B},$$

inéquation qui détermine le *rendement maximal* $\delta W / |\delta U_A|$ du moteur, comme l'avait déjà vu Carnot (section 1.3).

Dans bien des cas, l'énergie n'est pas la seule quantité conservative en jeu, et les sous-systèmes peuvent échanger d'autres grandeurs, par exemple des particules de tel ou tel type, notamment en chimie. Ils peuvent aussi échanger du volume, lorsque l'un des sous-systèmes se dilate aux dépens d'un autre. En pareils cas, les bilans doivent tenir compte de toutes ces grandeurs conservées. Par exemple, le *dessalement de l'eau de mer* nécessite une décroissance de son entropie, puisque la dissolution du sel dans de l'eau est un phénomène irréversible où la dissipation est égale à l'entropie de mélange. Cette opération n'est rendue possible que grâce à un apport d'énergie, calorifique, mécanique ou électrique selon le procédé utilisé, apport permettant de faire croître l'entropie des sources extérieures d'une quantité supérieure à la baisse de l'entropie de mélange. De même, la croissance d'ordre associée au développement d'un être vivant nécessite une croissance d'entropie de son environnement, accompagnant des transferts d'énergie et de molécules diverses.

Enfin, l'équivalence entre manque d'information et entropie, mise en évidence par Brillouin, implique que l'enregistrement dans une mémoire d'une information doit s'accompagner, ici encore, d'une croissance d'entropie de l'environnement.

2.3. Principes de la thermodynamique hors équilibre

Les principes de la thermodynamique traditionnelle, rappelés précédemment, ne portent que sur des états de quasi équilibre. Grâce à la comparaison de l'état initial et de l'état final, ils permettent de faire un bilan des divers processus, et fournissent ainsi une borne théorique supérieure aux rendements. Mais ils ne donnent aucune indication sur les *rendements réels*, qui dépendent de la valeur de la dissipation totale. D'autre part, on est souvent intéressé dans les questions énergétiques, non seulement par l'énergie mais aussi par la puissance. Or, la thermodynamique traditionnelle ne nous renseigne pas sur le *déroulement des processus dans le temps*, sur lequel reposent les technologies. Comme nous l'avons signalé à la fin de la section 1.4, les lois qui régissent ces processus dynamiques, qu'ils soient mécaniques, thermiques, électriques ou chimiques, obéissent à des principes communs, tout au moins lorsque les états successifs du système restent voisins de l'équilibre. Nous allons passer sommairement ces principes en revue, en les illustrant à l'aide de l'exemple historique du problème de la chaleur (début de la section 1.3) reformulé dans le langage de la théorie générale. On pourra en première lecture survoler la section 2.3.1.

2.3.1. Les équations dynamiques

Lorsque de la chaleur se propage dans un milieu solide, la seule grandeur transportée est l'énergie. L'état du système à chaque instant est caractérisé par la valeur $\rho_E d^3\mathbf{r}$ de l'énergie (qui se réduit ici à l'énergie interne) dans chaque élément de volume ; le but est d'étudier l'évolution de la densité d'énergie $\rho_E(\mathbf{r}, t)$. Dans un problème général, l'état de chaque élément de volume (ou de chaque sous-système homogène) est caractérisé à chaque instant par la donnée d'un certain nombre de *variables extensives conservatives locales* qui peuvent comprendre l'énergie, la quantité de mouvement, le volume, ou le nombre de particules de tel ou tel type, et que nous désignerons par ρ_i .

A ces variables d'état sont associées des *variables intensives locales*, température, vitesse hydrodynamique, pression, potentiels chimiques. Etant donné que chaque élément de volume est presque à l'équilibre, ces variables intensives s'expriment en fonction des précédentes à l'aide des mêmes *équations d'état* qu'en thermodynamique d'équilibre. Dans le cas particulier du problème de la chaleur, l'équation d'état est la relation (1) entre densité d'énergie et température. Plus généralement, les équations d'état peuvent s'obtenir systématiquement en dérivant l'entropie par rapport aux variables extensives (comme l'énergie ou le volume). Il est donc naturel dans le présent contexte de choisir comme variable intensive γ_i conjuguée de la variable ρ_i la dérivée partielle de la densité d'entropie s par rapport à la densité ρ_i ; ceci conduit en particulier à caractériser la température locale par la variable :

$$\gamma_E = \frac{\partial s}{\partial \rho_E} = \frac{1}{T} , \quad (2)$$

inverse de la température absolue. (De même, la variable intensive γ_N associée au nombre de particules d'un certain type est $-\mu/T$, où μ est le potentiel chimique de ces particules.)

Lorsque le système entier est à l'équilibre global, la température est uniforme. L'écart à l'équilibre est donc caractérisé par la donnée en chaque point du gradient de la température, c'est-à-dire de $\nabla \gamma_E = -\nabla T/T^2$, et plus généralement de grandeurs appelées *affinités*, du type $\nabla \gamma_i$. (Pour un système constitué de sous-systèmes pratiquement homogènes, comme l'air d'une pièce et le radiateur qui le chauffe, l'affinité thermique est définie comme la différence de leurs variables intensives $\gamma_E = 1/T$; pour un conducteur électrique isotherme, l'affinité $\nabla \gamma_N$ est proportionnelle au gradient $\nabla \mu$ du potentiel électrochimique des porteurs de charge, c'est-à-dire à la force électromotrice; pour une réaction chimique, l'affinité est la combinaison linéaire des potentiels chimiques qui s'annule à l'équilibre; de part et d'autre d'un piston mobile, l'affinité associée au volume est la différence des pressions divisée par la température.)

Le déroulement des processus dans le temps est gouverné par le taux de transfert, d'un sous-système à l'autre, des grandeurs conservatives. Dans l'exemple ci-dessus du chauffage domestique, ce taux est mesuré par le *flux* de chaleur passant du radiateur à l'air de la pièce à travers la surface qui les sépare. Dans le cas général, des flux de chaleur peuvent exister pour toute paire de sous-systèmes voisins (entre l'air de la pièce et les murs ou les fenêtres, entre celles-ci et l'air extérieur); on doit aussi considérer des flux pour les autres grandeurs conservatives, flux de quantité de mouvement ou de particules (par exemple flux d'air sous une porte). Selon la version dynamique du premier principe, la dérivée par rapport au temps de l'énergie d'un sous-système est égale à la somme des flux d'énergie qu'il reçoit de ses voisins. Le même type de relation existe pour toutes les autres grandeurs conservatives. Pour un milieu continu, les flux à travers une surface sont engendrés comme des intégrales de surface des *densités de courant* \mathbf{J}_i ; par exemple, la densité de courant d'énergie \mathbf{J}_E est un champ de vecteurs qui se réduit pour un milieu solide à la densité de courant de chaleur. Le flux de chaleur sortant d'un élément de volume infinitésimal $d^3\mathbf{r}$ vaut $\text{div} \mathbf{J}_E d^3\mathbf{r}$. Le bilan pour chaque élément de volume des *lois de conservation* se traduit par une équation locale du type

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div} \mathbf{J}_i = 0 , \quad (3)$$

en particulier avec $i = E$ pour le problème de la chaleur ou avec $i = N$ pour la conservation du nombre de particules en dynamique des fluides. (En chimie, le flux associé à une réaction est défini comme la vitesse à laquelle cette réaction se produit; en mécanique, la flux de quantité de mouvement s'identifie au tenseur des contraintes.)

Les équations dynamiques sont complétées par un dernier ensemble de relations, qui permettent d'exprimer les flux en fonction des affinités. L'exemple le plus simple est la loi de Fourier (section 1.3) :

$$\mathbf{J}_E = -\lambda \nabla T \equiv L_{EE} \nabla \gamma_E , \quad (4)$$

où λ est la conductibilité calorifique, et où $L_{EE} \equiv \lambda T^2$. La forme de cette relation est intuitive. En effet, à l'équilibre global, les flux de chaleur s'annulent avec les gradients de température; un écart de température entre un point et un autre provoque un courant de chaleur qui tend à réduire cet écart. Dans un régime suffisamment proche de l'équilibre, ce courant est selon (4) proportionnel à la perturbation $\nabla \gamma_E$. Nous avons passé en revue à la section 1.4 un grand nombre de phénomènes régis par des lois analogues à (4). De Donder a posé en principe général que les *flux* (ou les densités de courant) sont *proportionnels aux affinités*, selon

$$\mathbf{J}_i = \sum_j L_{ij} \nabla \gamma_j . \quad (5)$$

Les *coefficients de réponse* L expriment la manière dont le système « répond », grâce à un transport des grandeurs conservatives, aux déviations par rapport à l'équilibre. Ils caractérisent la dynamique proprement dite ; ils n'apparaissent pas dans la « thermodynamique » traditionnelle qui, malgré son nom, concerne seulement les états d'équilibre caractérisés par des équations d'état du type (2), ainsi que les déplacements d'équilibre décrits par différentiation de ces équations.

L'équation de la chaleur résulte en définitive de (2), (3) et (4), qui donnent :

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} = \operatorname{div} \left(\frac{\lambda}{c} \nabla \rho_E \right), \quad (6)$$

où c est la chaleur spécifique par unité de volume du solide. Dans le cas général, les équations du mouvement s'obtiennent en combinant les *équations de réponse* semi-empiriques (5), dont de nombreux exemples ont été donnés à la section 1.4, aux *équations d'état* (2) et aux *équations de conservation* (3).

Plusieurs principes, que la physique statistique permet de déduire de la structure microscopique du matériau considéré (section 1.5), fournissent des contraintes sur ses coefficients empiriques de réponse L . Le *principe de Curie* exprime que les *symétries* du matériau, c'est-à-dire le fait qu'il reste ou non invariant sous l'effet de telle ou telle translation, de telle ou telle rotation, ou lorsqu'on prend son image dans un miroir, se reflètent sur les coefficients L . Ainsi, dans la relation (4), L_{EE} représente a priori une matrice 3×3 reliant les composantes du vecteur \mathbf{J}_E à celles de $\nabla \gamma_E$. Pour un matériau isotrope ou encore pour un cristal ayant les symétries du cube, cette matrice doit être proportionnelle à l'unité, de sorte que L_{EE} (ou λ) est un scalaire. Pour d'autres symétries cristallines, la matrice L_{EE} peut avoir plusieurs composantes indépendantes, avec une structure déterminée par le groupe cristallin.

Le *principe d'Onsager* se traduit par des relations du type $L_{ij} = L_{ji}$ ou $L_{ij} = -L_{ji}$, qui associent l'une à l'autre des propriétés résultant de l'échange des causes et des effets. Par exemple, pour les effets thermoélectriques (section 1.4), le coefficient L_{EN} , qui régit le courant de chaleur induit par un gradient de potentiel électrochimique (effet Peltier), est égal au coefficient L_{NE} , qui régit le courant électrique engendré par un gradient thermique (effet Seebeck). Les relations d'Onsager sont une conséquence de l'invariance par renversement du temps des équations dynamiques à l'échelle microscopique.

2.3.2. Taux de dissipation

Un dernier principe concerne la *dissipation*. Pour un flux de chaleur, on tire de (2), (3), puis (4) la variation par rapport au temps de la densité d'entropie $s(\mathbf{r}, t)$:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J}_S = \mathbf{J}_E \cdot \nabla \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{T^2} (\nabla T)^2 = L_{EE} (\nabla \gamma_E)^2, \quad (7)$$

où $\mathbf{J}_S \equiv \mathbf{J}_E / T$ définit la densité de courant d'entropie. La comparaison avec (4) montre que l'entropie n'est pas conservative, et que son taux de création par unité de temps et par unité de volume, ou *taux de dissipation*, est exprimé par le second membre de (7). Plus généralement, le taux de dissipation de tout processus assez proche de l'équilibre est donné par l'équation de *bilan détaillé* temporel:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J}_S = \sum_i \mathbf{J}_i \cdot \nabla \gamma_i = \sum_{i,j} \nabla \gamma_i L_{ij} \nabla \gamma_j. \quad (8)$$

Le dernier principe de la thermodynamique hors d'équilibre est alors exprimé par l'*inégalité de Clausius–Duhem*, selon laquelle l'expression (8) est en toutes circonstances positive (ou éventuellement nulle). Cette propriété est apparentée au deuxième principe de la thermodynamique traditionnelle, mais ne coïncide pas avec lui. Celui-ci, moins détaillé, se réfère en effet seulement à l'état initial et l'état final, et non au déroulement du processus dans le temps ; en revanche, il est plus

général car il ne suppose pas que le processus soit voisin de l'équilibre. La positivité de (8) implique des inégalités sur les coefficients de réponse L , par exemple $\lambda > 0$. Dans cette équation, le courant \mathbf{J}_S décrit un *transport* d'entropie d'un point à l'autre, il s'y superpose une *création* d'entropie en chaque point, proportionnelle au *carré* des flux ou des affinités. La *dissipation totale* associée à un processus est l'intégrale du second membre de (8) sur le volume du système et sur la durée du processus.

Ce résultat est important pour les applications à l'énergétique. En effet, si le principe de Carnot établit l'existence d'un rendement *maximal* pour un processus (section 2.2), le *rendement réel* peut être nettement inférieur ; il dépend des phénomènes physiques et des dispositifs utilisés, et aussi du temps τ mis pour réaliser le processus. Pour un système donné, si l'on cherche en un temps τ à transférer d'un sous-système à un autre une grandeur donnée, par exemple en convertissant une certaine quantité d'énergie d'une forme en une autre, les flux doivent être inversement proportionnels à la durée τ du processus, $\mathbf{J} \propto 1/\tau$. Il en est de même des affinités, $\nabla\gamma \propto 1/\tau$. Il résulte de (8) que le taux de dissipation est proportionnel à $1/\tau^2$, et donc que la *dissipation totale est proportionnelle à $1/\tau$* . Ainsi, plus on cherche à réaliser une action rapidement, plus son irréversibilité est grande ; les transformations *réversibles*, ayant le meilleur rendement possible, sont *infinitement lentes*. Les équations ci-dessus permettent d'estimer le véritable rendement. Ceci généralise une observation courante : du fait de la résistance de l'air, la consommation d'essence d'une voiture au kilomètre croît avec la vitesse.

Toute réalisation technologique nécessite en définitive un compromis entre l'*amélioration du rendement* (dans les limites imposées par le deuxième principe) et le raccourcissement de la *durée du processus*. Un exemple extrême est celui de l'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse : l'usine de Pierrelatte consomme, pour pomper l'hexafluorure d'uranium gazeux à travers les barrières poreuses qui laissent mieux passer l'isotope 235 que l'isotope 238, une énergie mécanique de 9 MWh par kg d'uranium enrichi, ce qui représente 7×10^7 fois plus que le minimum théorique imposé par la diminution de l'entropie de mélange !

2.4. Hiérarchie des énergies

La microphysique a mis en évidence l'existence de quatre interactions fondamentales entre particules élémentaires (section 1.6). Même si la théorie est parvenue à les unifier partiellement, elles ont des propriétés très différentes qui se reflètent sur les énergies qui leur sont associées à l'échelle macroscopique. Nous les passons en revue par ordre d'intensités décroissantes, ce qui fournit encore une nouvelle classification des énergies.

2.4.1. Interaction forte

L'interaction la plus intense, dite forte, est responsable de la *cohésion des noyaux*. Elle est en jeu dans la radioactivité α et dans la plupart des réactions nucléaires. Elle attire entre eux les nucléons (protons et neutrons). Sa portée est de l'ordre du *femtomètre* ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), et son intensité est de l'ordre de 1 à 10 MeV, ordre de grandeur de l'énergie de liaison d'un nucléon dans un noyau.

Cette énergie est suffisamment forte pour qu'on puisse l'observer, selon la formule $E = mc^2$, sous forme de masse. En effet, les masses atomiques ne sont pas exactement proportionnelles au nombre de protons et de neutrons, et le *défaut de masse* mesure l'énergie de liaison, à raison d'environ 1 mg mol^{-1} pour 1 MeV. Ce chiffre, calculé à l'aide des facteurs de conversion de la section 2.1.2, est une fraction significative de la masse atomique (1 g mol^{-1} pour H). L'énergie de liaison par nucléon est maximale au milieu du tableau de Mendeleïev : d'environ 8,5 MeV pour un nombre de masse $30 < A < 120$, elle tombe à 7,5 MeV pour $A > 220$; elle croît de 1 MeV à 7 MeV entre ^2H et ^4He . On peut donc récupérer de l'énergie (calorifique) par réactions soit de *fission* de noyaux lourds (U, Pu, Th) dans un réacteur, soit de *fusion* menant à ^4He .

L'énergie *solaire*, qui quitte le Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique, est engendrée dans son cœur par des réactions de fusion successives transformant l'hydrogène en hélium. Les recherches sur la fusion contrôlée ne reposent pas sur ces réactions, impossibles à réaliser, même en laboratoire, mais sur la fusion du deutérium ^2H et du tritium ^3H ; le premier peut être extrait de l'eau de mer, le second doit être produit par fission du lithium.

2.4.2. Interaction électromagnétique

L'interaction coulombienne est à la base de très nombreux phénomènes énergétiques. En raison de son comportement en $1/r$, elle se manifeste avec deux intensités différentes.

A l'intérieur des noyaux, où les distances entre nucléons sont de l'ordre du fm, l'interaction coulombienne $e^2/4\pi\epsilon_0 r$ entre deux protons, répulsive, est de l'ordre du MeV. Elle est donc significative devant l'interaction forte. Elle est responsable, lorsque les noyaux deviennent de plus en plus lourds, de la décroissance de leur énergie de liaison puis de leur instabilité. Elle constitue le principal obstacle à la réalisation de la fusion contrôlée, car elle s'oppose au rapprochement des noyaux chargés jusqu'à une distance égale à la portée de l'interaction forte susceptible de les lier. Afin de la surmonter, il faut communiquer aux noyaux une énergie cinétique relative importante, grâce à une élévation considérable de la température (10^7 K dans le cœur du Soleil) et de la densité. Enfin, elle intervient dans la radioactivité γ .

Cependant, pour toutes les autres applications à l'énergétique, les distances entre particules chargées, noyaux ou électrons, sont de l'ordre de l'*angström* (10^{-10} m = 0,1 nm), et leurs énergies coulombiennes caractéristiques sont donc de l'ordre de l'*électron-volt*. En effet, les phénomènes à l'échelle atomique sont gouvernés par l'interaction coulombienne et par la physique quantique qui régit la dynamique des électrons (ainsi que celle des noyaux, mais ceux-ci, beaucoup plus lents, contribuent beaucoup moins à l'énergie). Les seules constantes fondamentales et données physiques qui apparaissent dans ce problème sont e , ϵ_0 , \hbar et la masse m de l'électron (la constante c , par exemple, ne peut intervenir car les vitesses en jeu ne sont pas relativistes). La seule grandeur ayant une dimension de longueur que l'on puisse construire avec ces constantes est, à une constante numérique près,

$$\frac{4\pi \hbar^2 \epsilon_0}{me^2} = 0,53 \text{ \AA} ,$$

le rayon de Bohr de l'atome d'hydrogène. De même, la seule énergie est :

$$\frac{me^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = 13,6 \text{ eV} ,$$

l'énergie de liaison de l'atome d'hydrogène. Ces chiffres apparaissent comme conséquence de la compétition entre attraction coulombienne et tendance à l'étalement imposée par la physique quantique. Dans les molécules et les solides, dont les propriétés sont aussi gouvernées principalement par les électrons, les ordres de grandeur sont les mêmes : les distances entre noyaux sont encore de quelques angströms, et les énergies de liaison typiques de 0,1 eV à quelques eV par atome.

Ces ordres de grandeur se reflètent à notre échelle dans de nombreuses énergies d'usage courant, qui sont dominées à l'échelle microscopique par l'interaction électrique ou plus généralement électromagnétique. L'énergie *chimique*, libérée par exemple par une combustion, n'est autre qu'une variation d'énergie coulombienne et cinétique associée au réarrangement des molécules. Rapportée à une mole, une énergie par particule de 1 eV conduit à $96,5 \text{ kJ mol}^{-1}$, c'est-à-dire 27 Wh mol^{-1} ou 23 kcal mol^{-1} (section 2.1.2). On vérifie que la chaleur de combustion du pétrole (1 tep = 12 MWh) correspond bien à quelques dizaines d'eV par molécule (plus précisément 0,45 eV fois la masse molaire moyenne en g mol^{-1}). D'autres réactions chimiques que les combustions donnent en général des chiffres plus faibles quoique comparables. Par exemple, en *électrochimie*, la force électromotrice typique d'une pile, 1 à 3 V, indique que la variation d'énergie d'un électron est de 1 à 3 eV lorsqu'il

passé d'une électrode à l'autre. La même valeur se retrouve pour la largeur typique d'une bande interdite de semi-conducteur, paramètre essentiel pour les *photopiles* et tous les dispositifs *électroniques*. En *biochimie*, la source d'énergie des processus intracellulaires est l'hydrolyse de l'ATP en ADP (adénosine tri- et diphosphate), réaction qui dégage 0,5 eV par molécule ou 50 kJ par mole. Dans un organisme humain, 40 kg d'ATP sont ainsi transformés chaque jour, ce qui nécessite une régénération permanente d'ADP en ATP par consommation de glucose fourni par l'alimentation ; ce chiffre est en accord avec la puissance moyenne absorbée sous forme d'aliments, 2700 kcal par jour ou 130 W.

La cohésion des solides est analogue à la liaison des molécules. En conséquence, leur énergie *élastique*, par exemple celle d'un ressort tendu, leur énergie *calorifique*, qui reflète à notre échelle les vibrations du réseau cristallin ou dans un métal les mouvements des électrons, sont de nature électromagnétique. La valeur de l'énergie de liaison peut s'estimer à l'aide des chaleurs de fusion et de vaporisation, par exemple pour l'eau 0,06 eV (correspondant à 80 cal g⁻¹) et 0,1 eV par molécule, chiffres encore en accord avec les ordres de grandeur ci-dessus.

Bien entendu, l'énergie *électrique* macroscopique se rattache directement à l'interaction électromagnétique microscopique, qu'elle met en évidence à notre échelle grâce à des mouvements collectifs de charges élémentaires ou à des densités de charge macroscopiques. Les unités électriques usuelles traduisent d'ailleurs les ordres de grandeur de la microphysique. A l'énergie de 1 eV pour un électron correspond une différence de potentiel de 1 V. La charge de N_A électrons est le faraday, qui vaut 96 500 C ; ce rapport de l'ordre de 10⁵ traduit le fait que seule une faible fraction des électrons ou des ions est mobile dans un conducteur.

Il faut souligner dans ce contexte l'importance technologique du *magnétisme* et surtout du ferromagnétisme, sans lequel nous n'aurions ni alternateurs, ni moteurs, ni transformateurs, ni donc lignes à haute tension. Il est intéressant de noter que le magnétisme, propriété essentielle pour notre emploi quotidien de l'électricité, n'existerait pas en physique classique : il ne s'explique à l'échelle microscopique que grâce à la physique quantique.

Enfin, l'énergie *radiative* (*solaire*, ou émise par une lampe électrique, ou transformée en chaleur dans un four micro-ondes) est aussi de nature électromagnétique. Ici encore, on retrouve l'énergie caractéristique de 2 eV, qui est celle d'un photon de 0,6 μm au milieu du visible (section 2.1.2). Les plantes se sont adaptées à cette valeur, puisque l'énergie caractéristique de l'assimilation chlorophyllienne est du même ordre. En effet, la fixation d'une molécule de CO₂ atmosphérique sur une molécule d'eau pour donner un chaînon glucidique – CHO – et de l'oxygène nécessite un apport d'énergie de 5 eV (correspondant à 500 kJ mol⁻¹) fourni par le flux lumineux.

2.4.3. Interaction faible

Beaucoup moins intense que l'interaction électromagnétique, l'interaction dite faible est responsable de la radioactivité β. Les énergies qu'elle met en jeu sont de l'ordre d'une fraction de MeV, donc appréciables même en tant que variations de masse, comme pour l'interaction forte. Sa faiblesse se traduit par une probabilité extrêmement petite des processus qu'elle gouverne. Elle n'intervient dans les questions énergétiques qu'en une circonstance, cachée mais importante. Parmi les réactions nucléaires successives qui libèrent l'énergie *solaire*, la réaction initiale est la fusion de deux protons en un deutéron (plus un positon et un neutrino). Contrairement aux réactions ultérieures qui mènent en définitive au noyau d'hélium, cette fusion est un processus faible, donc très peu probable. Elle est d'ailleurs inobservable en laboratoire. Elle constitue pour la dynamique des réactions de fusion un goulot d'étranglement qui rend *très lente* la transformation d'énergie nucléaire en chaleur dans le Soleil : la production de chaleur dans le cœur du Soleil (qui représente 1/3000 de son volume) n'est que de 800 W m⁻³, à comparer au dégagement de chaleur par le corps humain, 100 W au repos (dont 20 % pour le fonctionnement du cerveau), 500 W en activité physique. C'est cette petitesse qui permettra au Soleil de rayonner pendant une dizaine de milliards d'années.

2.4.4. Interaction gravitationnelle

L'interaction gravitationnelle est la plus faible des quatre interactions fondamentales. Sa forme, $-GMM'/r$ pour deux masses M et M' , est semblable à celle de l'interaction coulombienne. Mais la constante de gravitation vaut $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ J m kg}^{-2}$, de sorte que l'attraction gravitationnelle entre deux protons est 8×10^{-37} fois plus faible que leur répulsion coulombienne. Cette attraction devient sensible à notre échelle grâce à la grande masse des objets en jeu. En particulier, c'est la masse de la Terre qui engendre le potentiel de gravité, source de l'énergie *hydroélectrique*. Les unités SI sont adaptées à ce phénomène, puisque la chute de 1 kg d'eau sur 1 m lui communique une énergie cinétique de $9,8 \text{ J} = 2,7 \text{ mWh}$, faible devant le kWh, énergie caractéristique associée pour 1 kg de matière à l'interaction électromagnétique.

L'énergie *cinétique* macroscopique, mise en œuvre dans une turbine ou une éolienne, s'apparente à l'énergie potentielle gravifique de point de vue des ordres de grandeur. De fait, énergies cinétique et potentielle s'échangent presque réversiblement (aux effets de viscosité près) dans une usine hydroélectrique. Sur le plan théorique, gravitation et mouvement sont d'ailleurs unifiés par la relativité générale. (L'énergie cinétique microscopique, qui se traduit dans un gaz par son énergie interne, a un ordre de grandeur plus élevé, s'approchant de celui des énergies chimiques.)

La gravitation, comme les autres interactions, joue un rôle dans le fonctionnement du Soleil en tant que machine énergétique. Une élévation accidentelle de température a pour effet d'augmenter le taux de fusion nucléaire, donc d'accroître la production d'énergie. Si cette énergie excédentaire se transformait en chaleur, la température augmenterait encore, ce qui ferait en définitive exploser notre étoile ! A l'inverse, un refroidissement local serait amplifié par la baisse résultante du taux de réaction, jusqu'à l'extinction du Soleil. C'est la gravitation qui fournit un remarquable mécanisme de *stabilisation du flux* d'énergie solaire. On montre en effet que l'équilibre entre forces de pression et de gravité à l'intérieur du Soleil implique que son énergie totale, négative, est la moitié de son énergie gravitationnelle, donc l'opposée de son énergie interne. Un accroissement de l'énergie totale provoque donc, grâce à la dilatation du Soleil qui l'accompagne, une diminution égale de l'énergie interne, donc une baisse de température, ce qui ramène le taux de conversion d'énergie nucléaire en chaleur à sa valeur stationnaire.

3. Comparaisons

Nous examinons maintenant les conséquences des principes de la physique sur divers facteurs qui conditionnent l'emploi de l'énergie : concentration, dégradation, transport, stockage, réserves, nuisances. D'importantes différences apparaissent des ces points de vue entre les diverses formes d'énergie, ainsi d'ailleurs qu'en ce qui concerne les facteurs économiques et sociaux que nous laissons de côté (coûts, investissements, besoins mondiaux, etc.).

3.1. Concentration

Les formes d'énergie que nous utilisons sont plus ou moins concentrées, selon la quantité de matière nécessaire pour les mettre en œuvre. De façon remarquable, la classification de la section 2.4 ci-dessus, basée sur la microphysique contemporaine, reste valable à notre échelle. On est ainsi amené à distinguer trois niveaux de concentration, qui diffèrent considérablement l'un de l'autre, par un facteur situé entre 10^4 et 10^6 . Nous illustrerons ce fait en examinant quelle masse de matière est en jeu pour extraire une énergie de 1 kWh.

Le *niveau intermédiaire*, le plus courant, correspond aux très diverses énergies de *nature électromagnétique*. Le kWh y est associé à des masses de l'ordre du *kilogramme*. Ainsi, pour l'énergie *chimique*, les carburants fournissent de la chaleur à raison de 1 kWh par 0,1 kg environ (souvenons-nous que 1 tep = 12 MWh). Pour la *chaleur*, 1 kWh permet de faire fondre 10 kg de glace, de porter de 20°C à 100°C la même quantité d'eau, ou d'en faire bouillir 1,5 kg. Nos consommations domestiques d'*électricité* se mesurent aussi en kWh, compte tenu de la puissance de nos appareils ménagers, située entre 10 W et 5 kW. Enfin, la puissance du *rayonnement* solaire est au niveau du sol de l'ordre de 1 kW par m² perpendiculaire aux rayons incidents ; ce chiffre est assez fort pour permettre aux mécanismes biochimiques et bioénergétiques de fonctionner, mais assez faible pour ne pas trop perturber ceux-ci.

Les énergies *les plus concentrées* sont les énergies nucléaires, basées sur l'*interaction forte*. Ici, le kWh est associé à une masse de l'ordre du *milligramme* ou même moins. Ainsi, une quantité de chaleur de 1 kWh est dégagée par *fission* dans une centrale nucléaire grâce à la consommation de 10 mg d'uranium naturel, contenant 0,7% d'uranium 235 fissile. L'emploi industriel de surgénérateurs permettrait de gagner un facteur 100 en récupérant l'énergie de fission du plutonium produit par capture de neutrons par l'uranium 238 non fissile. La *fusion*, objectif lointain, serait encore plus efficace ; dans le Soleil, 5 µg d'hydrogène suffisent à la production de 1 kWh, cette émission de chaleur étant compensée par une perte de masse de 0,04 µg.

Les énergies *les plus diluées* sont l'énergie *gravitationnelle* et les énergies *mécaniques*, pour lesquelles le kWh est associé à des masses de l'ordre de 10 *tonnes*. Pour produire 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique, dont le rendement est de 85%, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau de 40 m ; avec une éolienne, il faut récupérer toute l'énergie cinétique de 20 000 m³ d'air (27 tonnes) arrivant à 60 km/h. De même 1 kWh est l'énergie cinétique d'un camion de 10 tonnes roulant à 100 km/h. Pour prendre conscience de l'écart entre ces nombres et ceux associés à l'énergie calorifique, on peut noter que si toute l'énergie mécanique d'un œuf tombant de la tour Eiffel était absorbée par cet œuf sous forme de chaleur, sa température n'augmenterait que de 0,7°.

Ces écarts considérables ont d'importantes conséquences. Un réacteur électronucléaire de 1000 MW électriques, dont le rendement est de 33 %, ne consomme que 27 tonnes d'uranium enrichi à 3,2% *par an*, le quart de son chargement, alors que pour la même puissance une centrale thermique, d'un rendement de 38 %, consommerait 170 tonnes de fuel ou 260 tonnes de charbon *à l'heure*, et qu'une centrale hydroélectrique nécessiterait la chute de 1200 tonnes d'eau *par seconde*, de 100 m de haut. La dilution, assez grande, de l'énergie solaire se traduit par le fait qu'il faudrait 30 km² de panneaux solaires semi-conducteurs pour atteindre en moyenne journalière par effet photovoltaïque cette puissance. L'énergie du vent est encore moins adaptée à la production massive d'électricité nécessaire à nos villes, puisqu'il faudrait 3000 à 4000 éoliennes d'une puissance de 0,7 MW pour produire la même énergie annuelle qu'un réacteur de 1000 MW, compte tenu du fait que les éoliennes ne fonctionnent au mieux que pendant la moitié du temps. Le Danemark et les Pays-Bas, qui ont fait un effort considérable pour s'équiper en éoliennes, n'arrivent pourtant à en tirer que quelques pourcent de leur électricité et doivent, à défaut de nucléaire ou d'hydraulique, faire appel au pétrole ou au charbon – de sorte que ce sont les deux pays d'Europe (après le Luxembourg) qui produisent le plus de CO₂ par tête, environ 12 tonnes par personne et par an (deux fois plus qu'en France, mais deux fois moins qu'aux Etats-Unis). Les formes diluées de l'énergie, lorsqu'elles sont utilisées pour produire de l'électricité (éoliennes, piles solaires, microcentrales hydrauliques), devraient être réservées à des usages spécifiques, utiles quoique voués à rester marginaux, comme l'alimentation de lieux isolés qu'il serait coûteux de relier au réseau, ou encore pour le photovoltaïque la fourniture de faibles puissances.

3.2. Dégradation

Le deuxième principe implique, compte tenu de l'expression de l'entropie en fonction des variables associées aux diverses formes d'énergie, que celles-ci ont tendance à se dégrader (section

2.2.1) : les énergies mécaniques et électrique en particulier tendent à se transformer irréversiblement en chaleur. L'exemple du bilan énergétique du fonctionnement d'une voiture (section 2.1.1), ou de la plupart des appareils ménagers (climatiseur, téléviseur, four, aspirateur, lampe, ordinateur, téléphone), montre que nos actions ont le plus souvent pour seul effet de transformer en dernier ressort diverses formes d'énergie en chaleur. Cette remarque a donné naissance au XIX^{ème} siècle au mythe de la « mort thermique de l'Univers ». On peut, dans une certaine mesure et en utilisant des dispositifs appropriés, contrecarrer cette tendance, à condition que l'entropie totale des systèmes isolés en jeu ne décroisse pas. C'est ce qui se passe par exemple dans un moteur thermique où le flux spontané de chaleur de la source chaude vers la source froide (qui fait croître l'entropie totale) est détourné, à notre profit, pour extraire une quantité limitée de travail (section 2.2.2), que l'on peut à son tour transformer en quasi totalité en énergie électrique. Mais l'énergie noble ainsi obtenue est souvent, volontairement ou non, reconvertie en chaleur.

Nous avons aussi vu (section 2.3.2) que la dissipation croît avec la rapidité des processus, de sorte que la dégradation de l'énergie est d'autant plus forte que nos actions prennent moins de temps. Des compromis sont donc nécessaires entre les durées souhaitées des processus et leurs rendements admissibles.

Les problèmes de *rendement*, notion liée à l'activité humaine, sont en effet essentiels dans toute question énergétique, car ce qui compte en pratique n'est pas la puissance totale mise en jeu mais sa fraction utile pour tel ou tel usage. C'est pourquoi il importe de distinguer par exemple, pour une centrale thermique, la puissance thermique (dont dépend la consommation de carburant) de la puissance électrique envoyée sur le réseau. Même si une telle distinction peut paraître banale, elle n'est pas toujours explicite dans les statistiques publiées. Ainsi, il est d'usage d'estimer l'équipement en éoliennes des pays européens en comparant les valeurs des puissances installées dans chaque pays, alors que les seuls chiffres significatifs seraient les puissances électriques fournies en moyenne annuelle.

L'énergie calorifique dégagée par les activités humaines n'a certes pas d'influence directe notable sur le climat, puisqu'elle ne représente que 1/10 000 de la chaleur reçue du Soleil. Elle implique cependant un gâchis considérable de nos ressources énergétiques. En effet, les *centrales thermiques*, qu'elles soient nucléaires, au fioul, au gaz ou au charbon, n'ont qu'un rendement de 33 à 38 % en électricité. La plus grande partie de la chaleur produite par réaction nucléaire ou chimique va donc se dégager en pure perte dans l'atmosphère, les rivières ou la mer à travers le condenseur. Or, le tiers de l'énergie totale que nous consommons est consacré au *chauffage domestique*, assuré le plus souvent par consommation directe de carburant ou d'électricité. On ne peut que regretter le trop petit nombre d'installations de *récupération de chaleur* auprès des centrales thermiques, susceptibles de produire de l'eau chaude notamment pour le chauffage urbain ; il est vrai qu'on se heurte à la nécessité d'investir dans un réseau de transport d'eau chaude.

Nous avons signalé à la fin de la section 2.2.1 le caractère *relatif* de la notion de dégradation dans le cas de l'énergie *chimique*. Celle-ci paraît le plus souvent équivalente de ce point de vue à la chaleur, puisque la combustion d'un carburant dégage directement de l'énergie calorifique. Cependant, il est possible, à l'aide de mécanismes ingénieux comportant en particulier une séparation spatiale d'ions réactifs, grâce par exemple à des électrodes ou des membranes biologiques, de transformer directement une énergie chimique en énergie électrique (batteries) ou mécanique (muscles). L'énergie chimique apparaît alors comme noble et il est théoriquement permis de l'utiliser sans la transformer d'abord en chaleur, et ainsi de réduire la dégradation. Certaines réactions chimiques peuvent même, selon la manière dont elles sont conduites, être utilisées thermiquement ou non. Ainsi, on peut imaginer des véhicules de l'avenir fonctionnant à l'aide d'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. Il sera alors beaucoup plus rentable, si la technologie le permet, d'utiliser à l'aide d'une *pile à hydrogène* ce corps pour produire de l'électricité (transformée en énergie mécanique par un moteur électrique) plutôt que de le brûler dans un moteur thermique dont le rendement est inexorablement limité par le principe de Carnot. Mais il faudra encore bien des recherches pour que le *rendement pratique* de pareilles piles dépasse cette limite et que l'on évite de gaspiller l'énergie de l'hydrogène

par dégradation en chaleur. Le fait que le *quart* de l'énergie totale que nous consommons est consacré aux *transports* montre l'intérêt de telles études.

De même, l'énergie *solaire* est a priori une énergie noble, transportée par un rayonnement ordonné. Sa dégradation par transformation en chaleur n'est pas inévitable. Les mécanismes biologiques (assimilation chlorophyllienne, muscles) en convertissent une faible part en énergie chimique ou mécanique. Les piles photovoltaïques en convertissent environ 10% en énergie électrique. Mais le progrès n'est pas limité par des principes physiques.

En définitive, ce ne sont pas des raisons de principe qui nous obligent à *passer par la chaleur* pour exploiter les énergies chimique et radiative, mais des questions de faisabilité pratique, de connaissance scientifique ou technologique, de taille, lenteur ou complexité trop grandes des mécanismes, ou de coût trop élevé.

3.3. **Transport**

Jusqu'à la révolution industrielle, seuls le transport du bois de chauffage et celui des aliments permettaient d'utiliser de l'énergie ailleurs que sur le lieu de production. Nous disposons aujourd'hui de deux moyens commodes de transport d'énergie (à côté des canalisations d'eau chaude).

Le premier moyen est l'emploi de *lignes électriques*. L'importance considérable de l'énergie électrique, ses multiples possibilités d'utilisation, résident précisément dans le fait que c'est la seule forme d'énergie susceptible d'être transformée en n'importe quelle autre et d'être transportée au loin en grande quantité à un coût énergétique relativement faible. En effet, grâce aux transformateurs qui permettent en courant alternatif d'utiliser des lignes à *haute tension*, les pertes par effet Joule peuvent être réduites. Elles sont en France de 8 %.

Le second moyen est le *transport des carburants*, par bateau ou par rail pour le charbon, par oléoduc ou navire pétrolier pour le pétrole, par gazoduc ou méthanier pour le gaz, par camion-citerne pour l'essence. Notons cependant que ce transport peut être dispendieux en énergie : le transport de charbon en Chine depuis le lieu de production jusqu'à Pékin consomme la moitié du chargement des trains ; une énorme proportion de gaz se perd en Sibérie en raison des fuites dans les gazoducs. Le transport de l'uranium pose moins de problème de pertes puisqu'on n'a besoin d'en véhiculer que de faibles volumes. L'essor du train à vapeur au XIX^{ème} siècle, celui de la *voiture* et de l'*avion* au XX^{ème} siècle, ont reposé sur la possibilité d'emporter *avec soi* sous forme de carburant l'énergie nécessaire pour parcourir des distances de plus en plus longues. Auparavant, il fallait sur mer nourrir des rameurs ou attendre le vent, sur terre multiplier les relais de poste, source d'énergie hippomobile.

L'énergie peut aussi être transportée à distance par un rayonnement : c'est sous cette forme que nous parvient l'énergie solaire. Cependant, on ne sait transférer ainsi dans la pratique que de faibles puissances, de sorte que l'emploi du rayonnement se limite à l'envoi par voie *hertzienne* de signaux de télécommunications (télévision, téléphonie, satellites, etc.).

3.4. **Stockage**

De même que le transport, le stockage entraîne des pertes d'énergie sous forme de chaleur, car il nécessite souvent un changement de forme d'énergie.

Les *carburants* offrent non seulement une commodité de transport mais aussi de stockage. Malheureusement, seul leur emploi pour le chauffage domestique ou industriel permet d'utiliser toute leur énergie chimique ; leur emploi dans les centrales électriques ou les véhicules fait perdre en chaleur 60 % de cette énergie.

Les *barrages* hydroélectriques constituent le seul moyen (indirect) de stocker de grandes quantités d'électricité. Ils sont de plus en plus souvent équipés de manière à fonctionner presque *réversiblement*, soit en faisant chuter l'eau pour produire de l'électricité, soit en pompant l'eau d'aval en amont. Dans les deux cas, la dégradation en chaleur est relativement faible. Ceci permet de stocker une énergie électrique produite en heures creuses par des centrales nucléaires (qu'il est préférable de faire fonctionner sans variation excessive de puissance), afin de la restituer au réseau en heures de pointe. La Suisse revend de la sorte à l'Italie de l'énergie électrique achetée auparavant en heures creuses à la France. Les barrages sont donc utilisables non seulement comme sources d'énergie hydroélectrique grâce à la pluie, mais aussi comme réservoirs d'énergie électrique.

Les *accumulateurs* constituent un autre moyen commode de stocker une énergie. Cependant, ici, les pertes sous forme de chaleur sont plus importantes. Surtout, les accumulateurs ont par unité de masse une *capacité limitée*, par exemple 35 Wh par kg pour ceux au plomb. Les meilleures valeurs sont actuellement de 0,15 kWh par kg pour les batteries au lithium des caméscopes ; on retrouve l'ordre de grandeur caractéristique des énergies de nature électromagnétique donné à la section 3.1. Ceci constitue la principale entrave au développement des voitures électriques (la puissance d'une voiturette est de l'ordre de 10 kW). On peut se demander si des progrès importants sont à espérer en ce domaine. Une évaluation numérique sommaire montre qu'ils resteront limités. Charger une batterie au lithium, métal le plus léger, élève le potentiel des ions Li^+ de 3 V, force électromotrice de la batterie, ce qui correspond à une fourniture d'énergie de $3 \times 96\,500$ J pour une mole (7 g) de Li, c'est-à-dire une capacité de 10 kWh par kg de Li, atomes actifs de la batterie. Mais celle-ci doit aussi comprendre un nombre beaucoup plus grand d'atomes de structure, qui créent le potentiel vu par les ions Li^+ , se comportent comme une éponge à travers laquelle ces ions peuvent se déplacer et délimitent deux régions où ils peuvent se fixer avec des potentiels chimiques différents. La capacité actuellement réalisée correspond à une masse totale 60 fois plus grande que celle du lithium actif, mais il semble difficile de réduire considérablement cette masse.

C'est pourquoi l'emploi de *l'hydrogène*, qui serait produit par électrolyse de l'eau et utilisé pour produire un courant électrique dans une pile à combustible, paraît une voie prometteuse quoique futuriste de stockage de l'énergie pour des voitures électriques. En effet, cette technique est associée à une énergie chimique de 32 kWh par kg d'hydrogène, nettement plus grande que celle des batteries et nécessitant moins de matériaux inactifs. Cette énergie par unité de masse est également supérieure à celle des carburants usuels, par exemple 12 kWh par kg de pétrole, et présente l'avantage potentiel de pouvoir être convertie en énergie électrique noble sans passage par une machine thermique.

Il faut enfin noter que l'énergie *solaire*, foncièrement intermittente, nécessite un stockage. Celui-ci est facilement réalisé par production d'eau chaude si cette énergie est captée pour le chauffage domestique, mais une pile photovoltaïque nécessite un couplage avec un accumulateur. Il en est de même pour l'énergie *éolienne*, sauf lorsqu'elle est utilisée pour pomper de l'eau comme dans les polders. Le développement de ces deux formes d'énergie pour la production d'électricité est donc conditionné par les progrès de l'électrochimie.

3.5. Réserves

Afin d'apprécier les problèmes de réserves énergétiques et de nuisances, il importe de noter qu'actuellement, à l'échelle mondiale, l'énergie (hors aliments) provient pour 40% du pétrole, pour 26% du charbon, pour 24% du gaz, pour 7% du nucléaire, pour 3% de l'hydraulique, le reste étant négligeable. Ces proportions montrent l'importance de la distinction entre énergies épuisables et renouvelables.

Les énergies *renouvelables* proviennent pour la plupart, directement ou non, du rayonnement solaire : énergies *solaire*, *hydraulique*, *éolienne*, *biomasse* (aliments d'une part, combustibles comme le bois, les déchets végétaux ou l'alcool d'autre part). Malgré leur pérennité, ces énergies sont très diluées ; la puissance maximale qu'elles sont susceptibles de fournir ne peut suffire à subvenir qu'à

une partie de nos besoins. Certes, la Terre reçoit du Soleil un flux de 1,4 kW par m² de surface apparente, ce qui représente en une heure l'énergie que les hommes consomment en un an. Compte tenu de la forme sphérique de la terre, de la réflexion et de l'absorption par l'atmosphère, la puissance qui atteint le sol, 160 W m⁻² en moyenne, reste importante. Mais les rendements des divers processus basés sur l'énergie solaire sont faibles.

Ainsi, l'assimilation chlorophyllienne n'exploite qu'une faible part du flux lumineux : les cultures sucrières, les plus productives en énergie biochimique, fournissent seulement en moyenne annuelle l'équivalent de 0,6 W m⁻². Ceci limite les perspectives de la biomasse. Elle est produite actuellement presque uniquement pour notre alimentation. Or, un homme consomme en moyenne pour se nourrir 2700 kcal par jour, c'est-à-dire 130 W, chiffre faible devant sa consommation de 2 kW en énergies conventionnelles (moyenne mondiale pour l'électricité et les carburants). Un développement significatif des biocarburants occuperait donc une part importante des terres cultivables, et malgré leur intérêt les combustibles végétaux ne pourront jouer qu'un rôle marginal.

On a vu que l'énergie éolienne nécessite énormément d'espace à puissance donnée. Les rendement des piles photovoltaïques atteint 10%, mais il faudrait 300 m² de panneaux par européen pour assurer en moyenne ses besoins en énergie, et leur fabrication nécessite pour l'instant une technologie dispendieuse. C'est dans le domaine du chauffage domestique que l'énergie solaire semble dans l'immédiat le mieux utilisable, grâce à des capteurs sur les toits produisant de l'eau chaude. Quant à l'énergie hydraulique, celle qui parmi les énergies renouvelables occupe (après l'énergie solaire directe) le moins de surface sur terre pour une puissance donnée, elle ne peut plus se développer que dans certains pays où il subsiste encore des sites adéquats pour l'installation de barrages. En France, l'équipement hydroélectrique approche de la saturation et fournit moins de 15% de notre consommation électrique.

La *géothermie* occupe une place particulière parmi les énergies renouvelables, car elle est issue non du Soleil mais de l'intérieur de la Terre, dont la température reste élevée en raison de sa radioactivité. Elle aussi ne peut fournir qu'une puissance limitée car elle est en général diluée, son flux étant de 1 W par m². De plus, il existe une grande variété de gisements dont l'exploitation pose des problèmes spécifiques ; certains sont épuisables..

Les autres énergies, *fossiles*, reposent sur l'exploitation de minéraux formés durant l'histoire de la Terre et n'existant qu'en quantités limitées. Au rythme de consommation actuel, les réserves mondiales reconnues ne peuvent couvrir qu'un *demi-siècle* pour le *pétrole*, un *siècle* pour le *gaz* et l'*uranium*, *quelques siècles* pour le *charbon*. On peut certes espérer que des technologies futures permettront d'exploiter des gisements déjà connus mais actuellement inutilisables car le pétrole y est trop dilué pour qu'on puisse l'extraire de la roche-réservoir. Mais, outre la hausse des coûts de production, ne serait-il pas plus judicieux de réserver le pétrole aux usages, actuels ou futurs, de la pétrochimie pour laquelle il est irremplaçable plutôt que de le brûler ? En n'utilisant que des technologies actuellement maîtrisées, la seule solution pour préserver à l'usage des générations futures les ressources en énergie électrique paraît être la construction de *surgénérateurs*, grâce auxquels l'énergie électrique extraite du nucléaire serait multipliée par 100. Ceci permettrait de couvrir la consommation *annuelle* d'électricité mondiale à l'aide seulement du *dix millième* des réserves d'uranium. Un jour peut-être, la fusion fournira une source d'énergie calorifique et électrique inépuisable grâce au deutérium contenu dans l'eau de mer. On peut aussi espérer que l'on parviendra à couvrir au moins une partie des besoins en chaleur et en électricité à l'aide du solaire.

Mais le problème reste entier pour le transport automobile, où il faudra trouver rapidement de nouvelles technologies n'ayant pas recours aux carburants fossiles.

3.6. Nuisances

Toutes les formes d'énergie engendrent des nuisances. La plus préoccupante d'entre elles est l'augmentation de l'*effet de serre* en raison de l'émission de CO₂ provoquée par la combustion de gaz, de pétrole ou de charbon. Par kWh fourni, le gaz dégage 49 g de CO₂, le pétrole 71 g et le charbon 86 g. De ce fait, la teneur de l'atmosphère en CO₂, qui oscillait jusqu'à il y a deux siècles entre 180 ppmv (parties par million en volume) lors des périodes glaciaires et 280 ppmv, a augmenté de plus en plus rapidement depuis le début de l'ère industrielle, jusqu'à la valeur actuelle de 365 ppmv. Ce chiffre est supérieur de 30% aux maxima atteints depuis 420 000 ans, période pour laquelle on a pu faire de mesures sur carottes glaciaires de l'Antarctique. Quelle que soit la politique énergétique mondiale, un doublement du CO₂ atmosphérique au cours du XXI^{ème} siècle paraît difficilement évitable. Le problème est d'autant plus complexe que quatre causes humaines d'importance comparable concourent à l'augmentation de l'effet de serre : le chauffage, les transports, la production industrielle, la production alimentaire. Cette augmentation de l'effet de serre est probablement responsable, au moins en partie, des changements climatiques observés au cours du dernier siècle : en moyenne mondiale, la température s'est élevée de 0,5°, le niveau des mers de 10 cm. L'emploi du nucléaire ou de l'hydraulique pour la production d'électricité réduit cette nuisance : les Etats-Unis ou le Canada émettent environ 20 t de CO₂ par tête et par an, l'Europe en moyenne 8 t, la France ou la Suède moins de 6 t ; le chiffre reste relativement élevé dans ces deux pays, bien qu'ils n'utilisent pratiquement pas de centrales thermiques, car le chauffage et les transports nécessitent un recours au pétrole, au gaz ou au charbon. D'ailleurs, à l'échelle mondiale, les carburants représentent 90% de l'énergie totale utilisée. Même si l'électronucléaire se répand dans le monde, il faudra, pour réduire les émissions de CO₂, généraliser le chauffage solaire et la récupération de chaleur des centrales, diminuer la part du pétrole dans les transports et parvenir à mettre au point de nouvelles technologies (perfectionnement du photovoltaïque, hydrogène pour les véhicules ?). Il convient de noter à ce propos que l'hydrogène, souvent présenté comme une panacée, n'est pas une source primaire d'énergie mais seulement un moyen de stockage ; il n'existe à l'état naturel qu'en combinaison et on ne peut l'extraire sans production de CO₂ sans faire appel à une énergie électronucléaire ou renouvelable.

Parmi les nuisances des industries de l'énergie, les *accidents* provoquent à juste titre l'émotion du public. Beaucoup d'entre eux seraient cependant évitables. Tchernobyl est le résultat d'une incurie notoire, de même que la plupart des déversements de pétrole dans la mer. Le retentissement médiatique d'un accident est cependant souvent sans mesure avec sa gravité : une catastrophe dans une mine de charbon en Asie ou en Europe de l'Est ayant causé de nombreuses pertes humaines peut passer inaperçue, alors que Three Mile Island, qui n'a causé par irradiation aucune victime, est dans toutes les mémoires.

Le problème de la radioactivité des *déchets nucléaires* est source de préoccupation générale. Le danger est évident, mais doit être relativisé par diverses comparaisons, d'abord avec celui du CO₂, puis avec celui des déchets radioactifs d'origine médicale, beaucoup moins délimité et moins bien contrôlé, avec celui des déchets chimiques, enfin avec la radioactivité naturelle. Faut-il s'inquiéter d'information alarmistes faisant état d'une activité du sol de quelques dizaines de milliers de becquerels au m² induite par des retombées de Tchernobyl, lorsqu'on sait qu'un corps humain émet en permanence 8000 Bq ? Ces peurs sont entretenues par une surestimation des effets sur nos cellules des faibles doses de rayonnement. Les réglementations et les croyances communes sont basées sur une extrapolation linéaire de ces effets à partir des valeurs observées pour de fortes doses. En réalité, des études de biologie et d'épidémiologie (confirmant l'idée selon laquelle la radioactivité naturelle n'a pas entravé le développement de la vie) ont montré que les effets des faibles doses, s'ils existent, sont très inférieurs aux estimations courantes. Ici encore, la physique doit aider à la réflexion : la très longue durée de certains déchets préoccupe le public, alors qu'elle implique une très faible activité. Un traitement rationnel des déchets suppose leur tri et une recherche de solutions différentes selon le temps de vie (stockage ou transmutation). Les progrès de la physique nucléaire, si les recherches nécessaires sont poursuivies, pourraient aboutir à une solution du problème, d'autant plus que le volume total à traiter est faible. Les surgénérateurs pourraient en particulier aider à se débarrasser du plutonium. Des recherches sont aussi en cours pour mettre au point de nouveaux types de réacteurs, qui ne seraient pas susceptibles de s'emballer et qui produiraient peu de déchets actifs.

Les *déchets chimiques*, dangereux comme le plomb issu de la fabrication des accumulateurs ou les métaux lourds contenu dans les piles, présentent des risques différents. Ils ne disparaissent pas avec le temps comme les produits hautement radioactifs. Ils sont beaucoup moins aisément détectables que des corps même très faiblement radioactifs, et passent plus facilement inaperçus.

Les efforts technologiques considérables faits pour réduire la *pollution de l'air* par les fumées d'usines ou les automobiles ont été efficaces, au moins dans nos pays : contrairement à un préjugé répandu, la pollution moyenne à Paris n'a cessé de diminuer depuis 50 ans malgré la circulation croissante. Elle présente cependant encore des pics dangereux certains jours et la recherche d'énergies propres reste indispensable.

La *pollution thermique*, issue de la dégradation de l'énergie (section 3.2), est globalement négligeable pour l'ensemble de la Terre. Elle peut localement conduire à une nuisance, associée par exemple à l'échauffement d'une rivière.

Les énergies renouvelables ne sont pas exemptes de nuisances. Les *barrages*, qu'ils soient grands ou petits, perturbent l'environnement, parfois de façon catastrophique. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'usine *marémotrice* de la Rance n'a pas eu de successeur. Les *éoliennes* occupent à puissance donnée beaucoup d'espace ; elles nécessitent chacune un socle de béton de 270 tonnes ; malgré les progrès, elles restent bruyantes et sont souvent critiquées, comme les pylônes électriques, pour la place qu'elles occupent dans le paysage. Les panneaux solaires noirs eux-mêmes peuvent choquer le sens esthétique. La *géothermie* se heurte à divers problèmes tels que la corrosion. Quant à la *biomasse*, sa production industrielle suppose l'emploi de quantités importantes d'engrais, ainsi que l'irrigation, au risque de pénurie d'eau et de pollution.

4. Conclusions

Associées à un concept scientifique déjà difficile à appréhender, les technologies de l'énergie posent des problèmes complexes. Comme on a pu le voir, leurs aspects sont multiples et contradictoires, même si on laisse de côté les questions économiques, sociales et politiques, de sorte qu'une *perspective globale* est indispensable à toute réflexion. Les énergies manifestent une grande diversité, en ce qui concerne tant leur forme que leur échelle d'intensité. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients. La multiplicité des sources répond ainsi à une *multiplicité des besoins*, et il faut se défier de tout simplisme à ce sujet. Bannir le nucléaire conduirait inexorablement à émettre plus de CO₂ vers l'atmosphère. Bannir les carburants serait non moins impensable : bien que la France, dont 80% de la production électrique est d'origine nucléaire, 15% d'origine hydraulique, parvienne à se passer presque totalement des carburants pour ses centrales électriques, elle doit faire appel à eux (principalement au pétrole et au gaz) pour 60% de son approvisionnement total en énergie. Nos besoins énergétiques se répartissent en effet en 35% pour le chauffage, 30% pour l'industrie, 25% pour le transport et 10% pour les usages domestiques et tertiaires. Par ailleurs, les énergies renouvelables, même si elles sont trop diluées pour remplacer celles qui sont couramment employées aujourd'hui, présentent des avantages qui justifient leur développement, mais à condition de les mettre en œuvre seulement pour des utilisations auxquelles elles sont adaptées. Enfin, certains besoins spécifiques peuvent appeler des solutions extrêmes : malgré le coût prohibitif de l'énergie qu'elles fournissent, piles et batteries sont irremplaçables pour montres et téléphones portable.

Prendre simultanément en compte les multiples questions énumérées dans la section 3, et les contraintes qu'elles impliquent, impose de *peser le pour et le contre* de chaque hypothèse. Il importe en effet de prendre conscience des diverses conséquences de chaque décision concevable, y compris celle de ne rien faire, de les comparer et de les hiérarchiser. Il est remarquable que le « principe de précaution », tel qu'il est énoncé dans la loi Barnier sur l'environnement, comporte des réserves : « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures *effectives* et *proportionnées* visant à prévenir un risque de

dommages *graves* et *irréversibles* à l'environnement à un coût *économiquement acceptable* ». Les adjectifs que nous avons soulignés supposent que l'on se soit livré à une évaluation comparative raisonnée des diverses mesures envisageables. Sans ces réserves, souvent méconnues, le principe de précaution peut conduire à des décisions discutables ou même aberrantes. L'abandon par l'Allemagne de l'électronucléaire, qui la conduira inéluctablement soit à émettre plus de CO₂ soit à réduire massivement et autoritairement les consommations, est-il rationnel ? Des partisans du développement des énergies renouvelables eux-mêmes en arrivent à s'opposer à tel ou tel projet de barrage ou d'éoliennes en découvrant ses nuisances. Même une mesure d'économie d'énergie peut avoir des conséquences indirectes dommageables : en Hongrie, une campagne du calfeutrage systématique des fenêtres lors du premier choc pétrolier a permis de réaliser des économies sur le chauffage, mais a conduit à une accumulation, dans l'air des appartements, de radon émis par le béton des murs ; de ce fait, la population est soumise chaque hiver à une irradiation supérieure à l'effet des retombées de Tchernobyl. Il semble par ailleurs que le calfeutrage soit, avec l'élévation de la température des appartements, l'une des causes de l'augmentation de 50% en une trentaine d'années des cas d'asthme, observée dans les pays les plus riches.

Toute réflexion sur l'énergie, avec les indispensables comparaisons qu'elle suppose, devrait s'appuyer sur des données chiffrées ou tout au moins sur des *ordres de grandeur*. Parmi ceux que nous avons passés en revue, certains devraient être gardés en mémoire, comme ceux qui concernent la plus ou moins grande concentration des énergies (section 3.1). On comprend également mieux les enjeux géopolitiques de l'énergie en sachant que la population mondiale est passée en cinquante ans de 2,5 à 6 milliards tandis que la production d'énergie était multipliée par 4, et que la puissance moyenne consommée est actuellement de 5 kW pour un européen, de 11 kW pour un nord-américain, de 1 kW pour un chinois et moins encore pour un africain. Ces chiffres montrent tout l'effort de développement à faire ; ils mettent aussi en évidence l'importance de la maîtrise de l'énergie, car la consommation énergétique ne reflète pas seulement un niveau de vie mais aussi un niveau de gaspillage : dans l'ex-URSS, la consommation par tête a avoisiné celle des Etats-Unis.

Parmi les problèmes de société majeurs dont l'opinion se préoccupe à juste raison, les questions énergétiques sont celles qui nécessitent le plus de faire appel à la science, en particulier à la physique. Celle-ci a un double rôle à jouer. D'une part, même si elle ne peut suffire à résoudre les multiples problèmes qui se posent, elle seule est susceptible de suggérer des solutions technologiques. Nous avons ci-dessus fait allusion à la réduction des rejets de CO₂, au stockage de l'énergie, au traitement des déchets nucléaires, à l'amélioration de l'emploi des énergies chimique ou solaire, aux progrès des réacteurs à fission, aux économies d'énergie, à une meilleure exploitation des gisements d'énergie fossile, à la géothermie, aux espoirs en la fusion. Pour toutes ces questions, des *recherches* fondamentales et appliquées sont cruciales. Il importe en effet de faire face à un défi majeur, celui de satisfaire aux besoins des hommes en énergie à l'échelle mondiale tout en préservant l'avenir de notre planète.

D'autre part, comme nous l'avons vu, une approche scientifique est non seulement utile, mais souvent indispensable pour embrasser les problèmes énergétiques. La science fournit des bases, assez peu intuitives, nécessaires à toute prévision et à tout débat sur l'énergie. Connaître les contraintes imposées par les lois naturelles nous guide, en nous empêchant aussi bien de nous livrer au pessimisme que de pêcher par excès d'optimisme. C'est un objectif primordial pour l'enseignement que de familiariser les élèves avec une *culture scientifique* qui, de surcroît, est essentielle à leur *formation citoyenne*. Ils seront ainsi mieux armés pour jauger objectivement les propositions politiques ou économiques et participer aux décisions démocratiques dans ce domaine de l'énergie où fleurissent trop facilement les préjugés simplistes et les mythes.

