

***LA PREMIÈRE ET LA DEUXIÈME LOI
DE LA THERMODYNAMIQUE***

Marcel Lacroix

Université de Sherbrooke

(juillet 1997)

LA PREMIÈRE LOI

La première loi de la thermodynamique est la loi de la conservation de l'énergie. Elle stipule que l'énergie d'un système ne change pas peu importe les évolutions que subit ce système. Cette loi est un exemple fondamental de la logique et de la formidable capacité prédictive de la science.

Julius Robert Mayer (1814-1878), un physicien allemand, fut le premier chercheur à proposer l'équivalence de toutes les formes d'énergie, incluant la chaleur, et à formuler la conservation de l'énergie totale. James Prescott Joule (1818-1889) consolida cette idée à travers ses expériences au laboratoire.

Même si la découverte de la loi de la conservation de l'énergie mit de l'ordre dans la pensée scientifique au 19^e siècle, elle contribua également à miner l'idée séculaire d'un monde éternel. En effet, la principale source d'énergie sur Terre est le soleil. Or, selon la première loi de la thermodynamique, le soleil ne peut irradier sa chaleur et sa lumière pour toujours. Autrement, il aurait besoin d'un apport infini d'énergie et le soleil, comme tous les corps, n'en renferme qu'une quantité finie.

En 1862, le physicien écossais William Thompson (1824-1907), connu aussi sous le nom de Lord Kelvin, estima que le soleil n'avait pu illuminer la Terre pendant plus de 100 millions d'années. D'autres scientifiques, partisans d'un univers éternel, proposèrent diverses alternatives : le soleil compense ses pertes d'énergie par des réactions chimiques, ou en s'alimentant d'impacts de météorites ou encore en libérant son énergie gravitationnelle. Thompson réfuta toutes ces théories. Selon lui, l'énergie chimique du soleil serait épuisée en mille ans. D'autre part, la quantité de matière pour alimenter le soleil serait telle que le flux de météorites s'abîmant dans le soleil perturberait de façon significative les orbites des planètes. Enfin, en libérant son énergie gravitationnelle, le soleil ne pourrait rayonner à son rythme actuel, que pendant 10 millions d'années. Thompson arguait que le soleil irradiait grâce à la chaleur contenue dans ses gaz. Inévitablement, le soleil se refroidissait et s'éteignait lentement. Il ne pouvait avoir existé au-delà de 100 millions d'années. C'était l'âge du soleil et, implicitement, celui aussi de la Terre.

Charles Lyell (1797-1875), célèbre géologue de son époque et fondateur de la Uniformitarian School of Geology, s'opposait à l'idée de la durée de vie du soleil et de la Terre. Lyell refusait obstinément de considérer que la Terre ait eu une origine. La Terre, disait-il, est aujourd'hui comme elle a toujours été et comme elle sera toujours. Elle est éternelle.

Cette idée de la durée de vie du soleil et de la Terre fut une étape cruciale dans l'évolution de la pensée humaine. Graduellement, l'homme devait accepter l'idée de mortalité de l'univers et des limites des ressources d'énergie. Pour nous, vivant au 20^e siècle, cela semble évident. Mais, pour l'homme du 19^e siècle, cette idée était choquante.

Bien que Thompson ait défendu et calculé la durée de vie finie du soleil, il ne connaissait pas l'énergie nucléaire qui fut découverte au 20^e siècle. Le soleil tire son énergie de la fusion de noyaux d'hydrogène et on estime que sa durée de vie n'est pas 100 millions d'années mais plutôt 10 milliards d'années. La première loi de la thermodynamique indique que le soleil n'a pas toujours rayonné et, qu'un jour, il s'éteindra.

À la fin des années 1920, le principe immuable de la conservation de l'énergie fut toutefois remis en question. Dans un type de désintégration radioactive, la désintégration Bêta, le noyau atomique émet un électron. Or, quand un noyau atomique émet une particule, le principe de conservation d'énergie exige que l'énergie transportée par la particule éjectée soit égale à l'énergie perdue par le noyau. Puisque le noyau atomique ne peut changer son énergie que par des quantités discrètes, tout comme l'atome d'ailleurs, on s'attendait alors à ce que l'électron émis ait une énergie discrète bien définie. Les mesures prises au laboratoire montrèrent, au contraire, que l'énergie des électrons émis couvrait toute une plage ! C'est un peu comme si, après avoir accordé un piano, en touchant deux notes distinctes sur le clavier, on entendait des milliers de notes entre elles. Les physiciens étaient stupéfaits. Neil Bohr (1885-1962), un des physiciens les plus célèbres du 20^e siècle et prix Nobel de physique (1922), proposa alors, courageusement, que le principe de conservation d'énergie pouvait, à l'échelle atomique, être violé. Même s'il l'avait proposée, cette idée lui déplaisait. La communauté

scientifique était déchirée. Werner Heisenberg (prix Nobel de physique 1932) se rangea aux côtés de Bohr. Wolfgang Pauli (prix Nobel de physique 1945), Ernest Rutherford (prix Nobel de physique 1908) et Paul Dirac (prix Nobel de physique 1933), d'autre part, s'y opposèrent malgré l'évidence expérimentale. En décembre 1930, Pauli suggéra alors, qu'en plus de l'électron une autre particule, difficilement détectable, était émise. Ainsi, le principe de conservation de l'énergie pouvait être respecté. Vingt-cinq années s'écoulèrent avant que cette particule, qu'on appelle neutrino, ne soit découverte. Le principe de conservation de l'énergie était sauvé.

LA DEUXIÈME LOI

Le deuxième principe de la thermodynamique stipule que le désordre dans tout système isolé croît inévitablement et irréversiblement avec le temps. Il explique pourquoi il faut faire le plein d'essence régulièrement pour rouler, pourquoi la bière se réchauffe et le café se refroidit, pourquoi la fumée de cigarette diffuse partout dans la pièce plutôt que de s'accumuler dans un coin, pourquoi le pendule s'arrête de lui-même et non l'inverse, pourquoi le temps s'écoule dans une direction et non dans l'autre, et pourquoi toute forme d'organisation meurt un jour. Tout comme pour la première loi, on n'échappe pas à la deuxième. Formulée pour la première fois par Thompson en 1852, la deuxième loi implique que la chaleur dans l'univers s'écoule, continuellement, des corps chauds vers des corps froids et que, par conséquent, l'univers perd graduellement sa capacité à produire un travail. La première loi stipule que la quantité totale d'énergie dans l'univers est constante alors que la deuxième loi implique que la quantité totale d'énergie utile diminue constamment. La quantité est à la première loi ce que la qualité est à la deuxième.

Dans la vie courante, perdre de l'énergie signifie la convertir en une forme moins utile. Une unité de haute qualité d'énergie est plus utile que trois unités de basse qualité. Par exemple, une quantité finie d'énergie calorifique à haute température est beaucoup plus intéressante pour l'ingénieur attaché à la production d'électricité dans une centrale thermique que la vaste quantité d'énergie calorifique à basse température disponible dans tous les océans tropicaux de la Terre.

Dans la culture nord-américaine, nous sommes fascinés par la quantité (1^{re} loi) et nous portons moins d'attention, bien que cela change lentement, à la qualité (2^e loi). Mais la quantité ne peut pas tout décrire. La qualité doit aussi être prise en compte. Dans la mesure du possible, les questions devraient être abordées du point de vue de la première et de la deuxième loi de la thermodynamique et ce même dans des domaines non techniques.

L'industrie milliardaire des régimes amaigrissants est un exemple instructif. Sa philosophie repose essentiellement sur la première loi de la thermodynamique. On compte les calories et les kilos. Mais si on considère que plus de 90 % des gens qui perdent du poids le reprennent éventuellement, et avec intérêt, il devient évident que la première loi ne dépeint pas correctement toute la situation. Une calorie issue de matières grasses est plus susceptible d'être emmagasinée comme une matière grasse qu'une calorie issue d'hydrates de carbone ou de protéines. Les chinois mangent plus que les américains (grammes et calories équivalents), et pourtant ils sont plus petits et moins gras. Au-delà de trente ans, le métabolisme chez l'humain ralentit sensiblement. Des régimes alimentaires frugaux prolongés enseignent à l'organisme à vivre avec moins de calories, le rendant ainsi plus efficace. Cela explique, en partie, pourquoi les adeptes de régimes d'amaigrissement reprennent tout le poids perdu aussitôt qu'ils abandonnent leur cure.

Je vois la thermodynamique comme la science qui étudie la conservation de la masse et de l'énergie (1^{re} loi), la génération d'entropie et la destruction d'exergie (2^e loi).

L'entropie est une mesure du désordre d'un système. Les gens efficaces mènent une vie pauvre en entropie. Ils sont organisés. Chaque chose a sa place et ils mettent peu d'effort (énergie) pour se retrouver. Les gens moins efficaces, d'autre part, sont plus désorganisés et mènent une vie riche en entropie. Ils doivent mettre plus d'effort pour retrouver leurs choses et ce faisant, ils ne s'y prennent pas correctement. Il m'arrive de penser que l'entropie a un sexe. Ma femme et ma fille mènent une vie dépourvue d'entropie alors que mon garçon et moi en rayonnons naturellement.

Une armée à haute teneur entropique est à peu près inutile. C'est la raison pour laquelle, lors d'un conflit, on s'empresse de bombarder le quartier général de l'ennemi. On veut la désorganiser (accroître son entropie). Une armée constituée de dix divisions est dix fois plus redoutable que dix armées constituées chacune d'une seule division. De même, un pays constitué de dix états est plus puissant que dix pays indépendants. Les États-Unis ne seraient pas aussi incontournables dans le monde s'ils étaient constitués de cinquante pays différents. Je me demande si, dans sa quête de souveraineté, le Québec saura faire mentir la deuxième loi de la thermodynamique... La version moderne du vieux dicton « divisons pour conquérir » pourrait être « accroissons l'entropie pour conquérir ».

L'ingénieur mécanicien et le psychologue travaillent tous deux inlassablement à réduire la génération d'entropie. L'un à réduire la friction entre les corps, l'autre entre les gens. Malheureusement pour le psychologue, l'entropie humaine est beaucoup plus difficile à quantifier...

On peut concevoir l'exergie d'un individu comme étant le maximum de travail qu'il puisse faire à un temps et à un endroit donné. Alors la différence entre l'exergie (X) et le travail réellement fait dans ces conditions (W) représente l'irréversibilité ou la perte de potentiel à faire du travail (I) :

$$\mathbf{X - W = I}$$

Dans tout système, l'ingénieur traque les principales sources d'irréversibilité et tente de les supprimer du moins de les minimiser pour maximiser la performance. Il en va ainsi dans la vie courante. L'exergie physique d'une personne croît avec l'entraînement alors que l'exergie intellectuelle croît avec l'éducation. Le vieillissement et l'inaction diminuent, par contre, l'exergie. Certains viennent au monde avec plus d'exergie (ils sont plus talentueux). Une personne reposée a plus d'exergie intellectuelle qu'une personne fatiguée. Le repos est donc un moyen de diminuer l'irréversibilité.

En thermodynamique, l'efficacité, définie selon la première loi, est le rapport entre le travail fait et la chaleur ajoutée. Cette efficacité ne considère pas cependant la meilleure

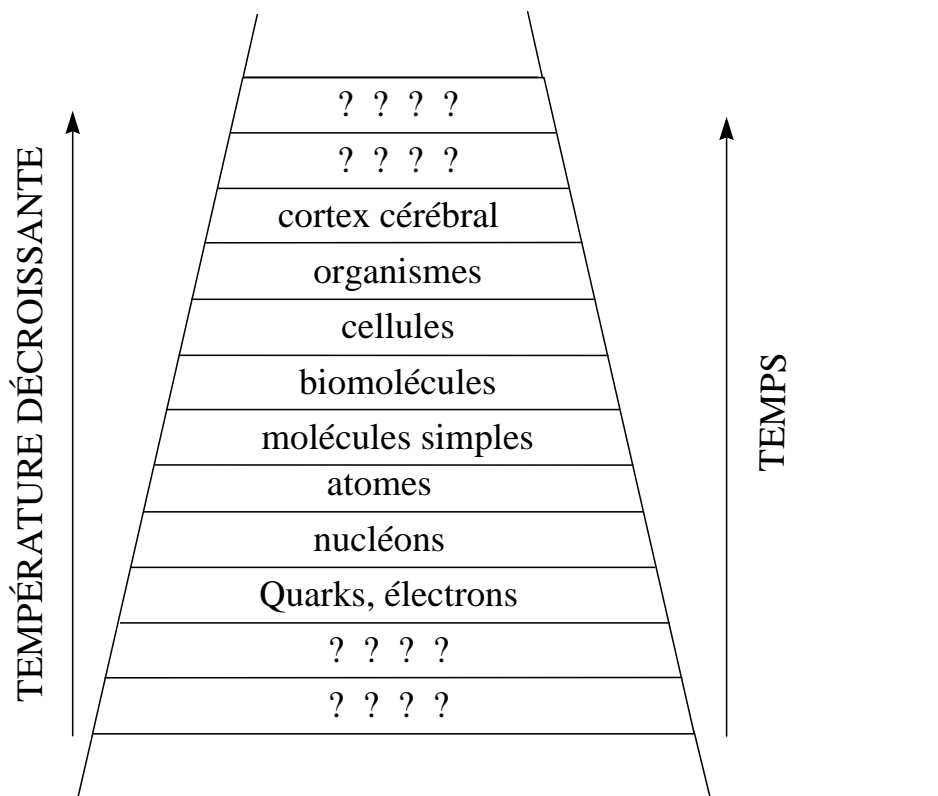
performance. L'efficacité, définie selon la deuxième loi, est, d'autre part, une mesure de la performance réelle par rapport à la meilleure performance possible dans les mêmes conditions. Alors l'efficacité d'une personne, selon la première loi, peut être vue comme sa réalisation par rapport aux efforts qu'elle a déployés. Selon la deuxième loi, son efficacité est sa performance par rapport à la meilleure performance possible dans les mêmes conditions.

Le bonheur est intimement lié à l'efficacité définie selon la deuxième loi. Les bébés sont vraisemblablement les êtres humains les plus heureux car ils peuvent faire peu de choses, mais ce qu'ils font, ils le font bien. L'efficacité thermodynamique de leur vie est élevée.

Pour accomplir une tâche manuelle routinière, une personne handicapée physiquement doit déployer beaucoup plus d'efforts qu'une personne en possession de toutes ses capacités physiques. Du point de vue de la première loi, elle est moins efficace. Selon la deuxième loi, toutefois, elle est beaucoup plus efficace car ce qu'elle accomplit est à peu près ce qu'elle peut faire de mieux dans les circonstances.

Un des corollaires de la 2^e loi de la thermodynamique est la mort inéluctable de tout système organisé. Dans l'univers, la matière a tendance à se structurer en systèmes hiérarchisés. Tous ces systèmes jouissent alors de propriétés plus riches que celles de leurs composantes. Sans contredit, la plus merveilleuse histoire d'organisation de la matière dont le scénario se précise au gré des découvertes scientifiques est la nôtre, celle de l'univers. On peut la schématiser par ce qu'Hubert Reeves appelle la pyramide de la complexité. Au bas de cette pyramide se trouve le système naturel le plus simple alors qu'au sommet trône le système le plus complexe que l'on connaisse. Il y a 15 milliards d'années l'univers se situe au bas de la pyramide. Toutes les particules de matière sont maintenues dans un état de dissociation complète et permanente par l'état d'extrême chaleur qui règne à cette époque. Toute association entre les quarks est impossible. C'est le chaos originel. L'organisation est absente. Cet univers est cependant en expansion. Il se refroidit. La température et la densité diminuent avec le temps. Quand la température passe au-dessous du trillion de degrés (10^{12}), les quarks, s'unissant trois par trois, donnent naissance aux nucléons (neutrons, protons). Quand on arrive à un milliard de degrés, une fraction des nucléons s'associe pour engendrer les premiers

noyaux d'hélium. L'horloge cosmique marque alors environ une minute. Un million d'années plus tard, les premiers atomes et les premières molécules d'hydrogène se forment quand, grâce à la diminution de la température, les électrons peuvent se fixer et rester en orbite autour des protons. C'est l'heure de l'émission du rayonnement fossile qui sera détecté pour la première fois par les astronomes Penzias et Wilson en 1965.



PYRAMIDE DE LA COMPLEXITÉ

À grande échelle cette fois, c'est quelques centaines de millions d'années plus tard qu'apparaissent les premières galaxies. En se fragmentant, la matière galactique donne naissance aux étoiles. À partir de cette époque, les événements associatifs pourront se multiplier dans ces creusets nucléaires. Les nucléons s'associent en noyaux lourds (hélium, carbone, silicium, fer). Projetés dans l'espace interstellaire à la mort de l'étoile (lorsqu'elle a épuisé son carburant nucléaire), ces noyaux capturent des électrons pour se constituer en atomes. S'associant entre eux, ces atomes forment des molécules ainsi que de minuscules grains de poussière de l'espace sidéral. En s'agglutinant, ces grains forment éventuellement des astéroïdes puis des planètes sur lesquelles se déposent, en certains cas, des atmosphères et des océans. C'est le cas, par exemple, de la planète Terre il y a 4,6 milliards d'années. Au sein de ces nappes fertiles, les molécules légères s'associent pour devenir des molécules géantes, puis des cellules vivantes, des organismes végétaux, animaux et enfin le cortex cérébral. C'est le sommet de la pyramide. Sur une échelle de temps de 15 milliards d'années, l'évolution, loin de ralentir, semble plutôt s'accélérer. En quatre millions d'années le cerveau de notre lignée est passé de 500 grammes à 1 400 grammes. Cette période est une fraction extrêmement faible de la durée de l'évolution biologique sur la Terre. Pour s'en rendre compte, résumons en un jour la durée de notre planète. À cette échelle, chaque minute vaut trois millions d'années. La Terre se forme à zéro heure. À quatre heures du matin, les algues et les bactéries prolifèrent déjà dans les mares tièdes. Les premiers mollusques et crustacés entrent en scène vers 18 ou 19 heures. À 23 heures apparaissent les premiers dinosaures. Ils s'éteindront quarante minutes plus tard. Au cours des vingt dernières minutes, les mammifères envahissent la planète et se différencient rapidement. Nos ancêtres font leur apparition dans les dix dernières minutes et voient leur cerveau tripler au cours des deux dernières minutes ! La science moderne voit le jour 0,008 seconde avant minuit. Pour cette raison, il est sage de ne pas fermer le sommet de la pyramide au cortex cérébral...

En redescendant la pyramide de la complexité, la matière se désorganise. Chez l'humain, la mort est prononcée lorsque l'activité organisée du cortex cérébral cesse. Le cortex n'est plus alors qu'une masse de tissus. On tombe d'un échelon. Les cellules (les composantes du système) n'étant plus alimentées, elles meurent rapidement. La chute se poursuit aux bio molécules et la perte d'organisation s'accroît. Les bio molécules se défont à leur tour en

molécules simples puis elles sont relâchées dans l'air ou sont absorbées par la matière organique du sol. C'est la putréfaction. Les molécules ainsi libérées participeront à la construction d'un autre organisme vivant.

La mort est en réalité une perte de complexité, une perte d'organisation. Et non une perte de matière. On peut dire, en quelque sorte, que selon la 1^{re} loi nous sommes éternels (conservation de l'énergie) alors que selon la 2^e loi nous sommes mortels (perte de complexité). La mort est le prix à payer pour atteindre les niveaux supérieurs de la pyramide de la complexité et assurer la continuité des espèces. Mais tout compte fait, je crois que ça en vaut le coût.

Une société est aussi un système hautement organisé et elle n'échappe pas non plus aux conséquences de la 2^e loi de la thermodynamique. La chute de l'empire romain est un exemple instructif. L'empire romain reposait sur une erreur capitale : Rome elle-même, une ville d'un million d'habitants dans un système technique néolithique. Si l'on tient compte de la médiocrité et du faible rendement des terres, cette ville ne pouvait être nourrie qu'aux dépens de l'empire tout entier. Il y fallait le blé, l'huile, le bétail et le vin provenant de Sicile, d'Égypte, du Maghreb et de la Gaule. L'empire n'était qu'une immense machine à nourrir la ville.

Pour faire fonctionner cette machine, il fallait des fonctionnaires, des marins, des soldats qui devaient eux aussi se nourrir aux dépens de l'empire. Cette énorme machine administrative fonctionnait avec le rendement décroissant dans le temps qui est de règle : chaque fonctionnaire n'avait d'autre ambition que de recruter d'autres fonctionnaires dont le nombre devint énorme. La corruption de ceux-ci pesa de plus en plus lourd dans le circuit économique. Le peuple de Rome, lui-même, vivant dans l'oisiveté faute de pouvoir travailler dans une industrie inexistante, n'avait pas d'autre fonction sociale que d'organiser la rotation rapide des empereurs par le système des émeutes urbaines. Pour distraire, accéder à la charge impériale ou s'y maintenir, il fallait recourir aux jeux, mobilisant des ressources supplémentaires.

Dans ce système, où le parasitisme constitue la seule forme de promotion sociale, les charges fiscales ne cessèrent d'augmenter pour atteindre 100 % à la fin de l'empire. Il fallut recourir aux mesures les plus extrêmes pour recouvrer les impôts : confiscation des biens, torture, vente du contribuable comme esclave. Les riches se faisaient exempter de fait en se réfugiant à la campagne, ce qui concentrait encore davantage de charges sur les classes moyennes, perdant petit à petit le goût du travail dans ce système spoliateur. Comme la matière imposable ne cessait de se raréfier, le recours à l'inflation devint une ressource habituelle pour se procurer des finances. Ainsi, de 335 à 368, le taux d'inflation atteignit mille pourcent. N'en pouvant plus, l'empire commença à s'écrouler en 410 lorsque Rome fut prise par les Wisigoths d'Alaric.

Rome montre, de façon limpide, les effets irrésistibles de la croissance de l'entropie dans un système fermé dont le désordre politique ne fera que refléter le chaos physique. La ville constituait au sein de l'empire un système ouvert qui puisait son énergie dans le système fermé du bassin méditerranéen. Les habitants de la ville pouvaient donc nourrir l'illusion qu'ils avaient accès à des ressources infinies. Le luxe, le gaspillage, le gigantisme de l'architecture avaient pour fonction de nier de façon spectaculaire l'existence de la loi de croissance de l'entropie. Plus l'empire se rapprochait de sa mort, plus ces spectacles devinrent nécessaires à l'illusion.

Ne peut-on pas tirer des comparaisons entre la Rome antique et notre société moderne? Peut-être. À cette époque toutefois les gestionnaires ne connaissaient pas la 2^e loi de la thermodynamique alors qu'aujourd'hui ils semblent l'ignorer.

Une des caractéristiques de l'évolution technique propre à la 2^e loi est son irréversibilité. Cette caractéristique résulte naturellement de la croissance de l'entropie ou, de façon équivalente, de l'épuisement progressif des ressources. Imaginons, pour un instant que la Terre soit une entreprise. D'une part se trouve le stock constitué de combustibles fossiles, de minerais, d'eau, d'air et de terres arabes. D'autre part, il y a un flux constitué uniquement d'énergie solaire à l'exclusion de toute matière. L'un est le capital et l'autre le revenu. En principe, l'entreprise constituée par l'espèce humaine ne pourrait utiliser son capital que pour

s'équiper afin de mieux capter son revenu. Tel est le cas lorsque l'on construit un barrage, des capteurs solaires, un moulin à vent, un réseau d'irrigation, une serre, une maison bien isolée.

Cependant, cette utilisation du capital ne constitue qu'une petite fraction de ce qui est dépensé. La plus grosse partie sert à faire rouler des voitures, à chauffer des maisons, à fabriquer des canettes de bière ou des boîtes de conserve. Nous mangeons notre capital de basse entropie et nous le mangeons de plus en plus vite lorsque le produit national brut (PNB) augmente.

Aucun économiste oserait donner à une entreprise industrielle ou commerciale le conseil de se contenter de manger son capital sans se soucier de se créer un revenu sous le prétexte que le capital de l'entreprise est grand au point d'être mal comptabilisé. Il aurait encore moins l'idée saugrenue de mesurer le progrès de l'entreprise au rythme croissant auquel elle dévore son capital. Cependant, il y a très peu d'économistes qui aient le courage de donner à l'entreprise Terre les mêmes conseils judicieux que ceux qu'ils prodiguent à toutes les autres entreprises.

La solution est pourtant incontournable (2^e loi) : le fonctionnement de l'entreprise doit s'appuyer sur la consommation du flux plutôt que sur la dilapidation du stock. Il s'agit de n'utiliser, comme énergie, que le flux solaire incident. Le capital d'énergie, sous forme de charbon, de pétrole et de matériaux fossiles doit être réservé, en principe, à la construction d'installations destinées à compter le flux solaire. Et aussi, de n'utiliser les matières premières qu'avec la plus extrême parcimonie. Ce n'est pas un hasard si les conclusions auxquelles nous conduit la 2^e loi de la thermodynamique coïncident avec les recommandations que j'ai faites dans le texte à propos de l'environnement..