

CARNETS
DE
SCIENCES

Christian Duquennoi

Les déchets

Du big bang
à nos jours

Prix Le goût des sciences 2016
Prix Roberval 2016
et Coup de cœur des médias

éditions
Quæ

Christian Duquennoi

Les
déchets
Du big bang
à nos jours

Éditions Quæ

Collection Carnets de sciences

Les insectes, histoires insolites

Patrice Leraut
2015, 120 p.

Oiseaux marins, entre ciel et mers

Fabrice Genevois, Christophe Barbraud
2015, 200 p.

Anatomie curieuse des vagues scélérates

Michel Ollagnon, Janette Kerr
2015, 176 p.

Géants des profondeurs

Ángel Guerra, Michel Segonzac
2014, 144 p.

Bactéries marines et biotechnologies

Jean Guézennec
2014, 176 p.

Nos abeilles en péril

Vincent Albouy, Yves Le Conte
2014, 192 p.

Étonnantes plantes de montagne

François Couplan
2013, 160 p.

Éditions Quæ
RD 10

78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2015
ISBN : 978-2-7592-2396-1
ISSN : 2110-2228

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

*Au fond de la nature pousse une végétation obscure :
dans la nuit de la matière fleurissent des fleurs noires.*
Gaston Bachelard

REMERCIEMENTS

Ce livre n'aurait jamais pu exister sans les idées essentielles, l'enthousiasme, la ténacité et le professionnalisme de Véronique Véto-Leclerc. Je tiens à la remercier du fond du cœur.

Je remercie aussi sincèrement tous mes collègues d'Irstea qui ont fourni des idées, des conseils, des relectures avisées et des illustrations.

Ma reconnaissance va également à tous ceux, famille et amis, qui m'ont encouragé pendant la rédaction de ce livre.

SOMMAIRE

Les déchets, la face cachée de notre monde	7
Ces voisins que l'on ne regarde pas en face	9
Les déchets dans le collimateur de la science	12
Fléau ou ressource ?	23
Les poubelles du jardin d'Éden	35
Et si Rousseau s'était trompé ?	37
Pas de vie sans déchets.....	38
500 millions d'années de traitement des déchets organiques.....	49
L'intelligence rudologique des coupeuses de feuilles	62
À l'aube d'<i>Homo ruderis</i>	69
Os, charbon et éclats de silex.....	71
Les pionniers du Levant	78
L'âge des amas coquilliers	87
Déchets de civilisation, civilisation des déchets	97
Une odysée de 5 000 ans.....	99
Le vent des révolutions.....	111
Poubelle planétaire ?	131
Les déchets au cœur de notre avenir	141
À l'école du vivant.....	143
Clé de voûte d'une nouvelle économie ?	149
Transformer les déchets en ressource : le retour de nos alliés les microbes.....	158
Crédits photographiques.....	166





Les déchets,
la face cachée
de notre monde



Les déchets, la face cachée de notre monde

Il y a quelques années lors d'une fête de la science, une petite fille, visiblement très intriguée par les travaux de recherche sur les déchets que je présentais, m'a lancé : « Beurk ! Vous travaillez dans les déchets ? C'est dégoûtant, pourquoi vous faites ça ? » Je lui ai expliqué que c'était important de s'en occuper, qu'on pouvait faire plein de choses en les recyclant, qu'on pouvait aussi les transformer en énergie pour économiser du pétrole... Mais j'ai bien vu à son regard que cela ne la convainquait pas du tout. Les bras croisés, toute renfrognée, elle lâcha un dernier « Beurk ! » avant de s'en aller.

J'ai longtemps souri de cette anecdote, mais à bien y réfléchir elle pose des questions qui me paraissent désormais essentielles. Quel regard portons-nous sur nos propres déchets ? Faut-il changer ce regard ? La science peut-elle contribuer à le changer ? Et finalement, pourquoi un scientifique s'intéresserait-il aux déchets ? N'aurait-il pas des sujets de recherche plus sérieux à traiter ?



■ Page précédente

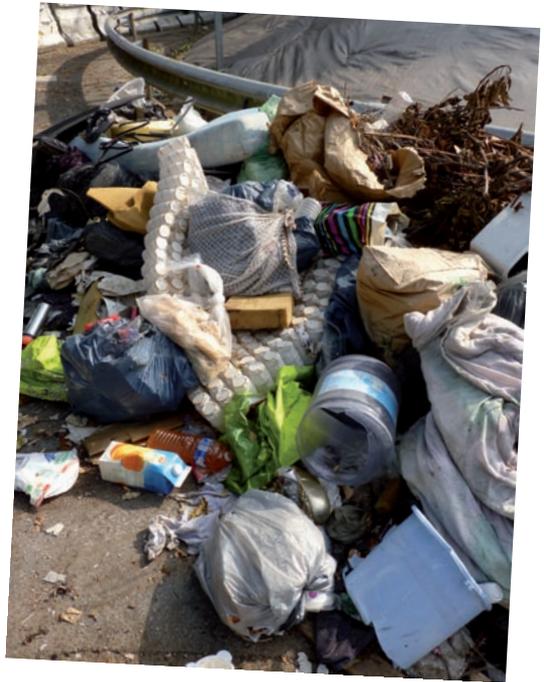
Balles de déchets plastique en attente de broyage chez un industriel du recyclage.



■ Ces voisins que l'on ne regarde pas en face

Chaque jour, nous côtoyons tous des déchets : nous remplissons nos poubelles et nous les sortons pour qu'une entreprise les « élimine ». Souvent, nous les trions. C'est un peu pénible, un peu compliqué, mais nous savons que c'est « bien pour la planète ». Il nous arrive d'entendre parler des problèmes posés par certains

déchets. Nous entendons dire qu'il y en a des dangereux, des toxiques. Nous entendons parler des déchets nucléaires et ça nous fait un peu peur. Des campagnes d'information nous disent que nous produisons trop de déchets, qu'il y en a partout, que « ça déborde ». On découvre aussi régulièrement des trafics de déchets, des exportations illégales. Et puis des images souvent terrifiantes, des décharges gigantesques à l'autre bout du monde, dans lesquelles vivent et travaillent des enfants. Tout cela nous indigne, à juste titre. Tout cela nous dégoûte parce que c'est le propre même des déchets, cette matière maudite dont on cherche à se débarrasser le plus vite possible, à éloigner de nos lieux de vie, à bannir de notre monde, de nos pensées.





Le sens du mot « déchet » : étymologie d'un laissé pour compte

Un déchet, c'est ce dont on ne veut plus, ce que l'on « jette ». Et quand on jette, cela finit toujours par retomber, par choir. Ainsi, le déchet signifie étymologiquement ce qui est tombé, ce qu'on a « laissé tomber », abandonné, ce qui est tombé en déchéance, en disgrâce. Et disgracieux, les déchets sont souvent considérés comme tels : on les appelle aussi parfois les « ordures », un mot qui a une racine commune avec « horrible » et « horripilant », ce qui choque, ce qui effraie, ce qui littéralement hérissé le poil !

Dans notre imaginaire aussi bien que dans notre vocabulaire, le déchet est donc ce qui a été « jeté en bas », dans les enfers, les mondes inférieurs, sombres, sales, répugnants, avec toutes les immondices. Les immondices, d'ailleurs, c'est tout ce qui est immonde, ce qui signifie « non-propre » étymologiquement. On leur donne aussi le nom de « détritrus », un mot latin qui veut dire « ce qui est usé ».

En anglais, c'est une tout autre racine indo-européenne qui est utilisée pour le mot *waste* qui se traduit par « déchet » en français. Ce mot désigne à l'origine de vastes étendues désertes et vides, sans aucune valeur pour les humains, puis par extension tout ce qui est sans valeur d'échange, ce qui est dépensé sans aucune compensation. Il y a dans *waste* une notion d'irréversibilité, de quelque chose que l'on perd à jamais, qui n'a plus aucune valeur, qui retourne au néant et qui n'en reviendra pas.



Il existe en anglais d'autres mots pour « déchet » : *garbage* vient d'un mot de vieux français qui désigne les viscères de la volaille. On est bien là dans le registre des immondices. Toujours en anglais, *refuse* est le cousin de l'italien *rifiuto* et qui signifie ce que l'on rejette, que l'on refuse de voir et d'utiliser. Le rejet et l'abandon se retrouvent d'ailleurs dans toutes les langues romanes pour traduire la notion de « déchet » : *restos* ou *residuos*, ce qui est « de reste », en espagnol et qui se rapproche de nos

« restes » de repas et de nos « résidus » industriels ; *desperdicio*, ce qui est perdu, ou *lixo*, ce qui est laissé, en portugais. Quand de la matière solide se dépose au fond du vin, on appelle cela de la lie, un mot qui possède exactement la même étymologie que *lixo*, le déchet portugais. Et quand on parle de la « lie de la société », on retrouve bien la même valeur péjorative que lorsque l'on parle des déchets, de ce qui est rejeté et méprisé.

C'est le latin *rudus* qui, finalement, emporte la palme du politiquement correct : bien qu'ayant la même racine que l'adjectif « rude », il désigne des débris de matériau solide, des gravats, des décombres. Mais le *rudus* latin possède aussi une connotation qui laisse un peu d'espoir quant à son utilité : il désigne également la masse informe et brute du minerai métallique qui n'est pas encore travaillé, une matière indispensable, précieuse et qui porte la promesse de richesse. On lui doit deux termes français très scientifiques : « rudéral », un adjectif utilisé uniquement en botanique et qui qualifie toutes les plantes qui poussent dans les friches, le long des chemins, à proximité des habitations, sur les décombres et les gravats ; et « rudologie », défini dans les années 1970-1980 comme la science des déchets.



Mais ces voisins embarrassants ne se laissent pas oublier aussi facilement. Et ils sont beaucoup plus complexes qu'on l'imagine. Et aussi beaucoup plus paradoxaux. Car bien sûr les déchets sont omniprésents, surabondants, sales, parfois dangereux. Bien sûr, les déchets, c'est du gaspillage de matière. Mais les déchets, ce n'est pas que ça.

Quand on y regarde d'un peu plus près, avec un regard un peu plus inquiet, on est obligé de reconnaître que c'est aussi une matière à transformer, à transmuter. On découvre qu'un déchet n'est pas qu'un possible poison mais est aussi un possible terreau de vie. En effet, on sait désormais qu'il n'y a pas de vie possible sans déchets. On sait que le vivant est obligé de produire des déchets, et que le vivant se nourrit de déchets, depuis la nuit des temps. Quand on les regarde objectivement, les déchets ne sont que de la matière, issue de nos métabolismes, de nos activités, de nos sociétés. Et rien d'autre que de la

Les déchets, c'est officiel !

En droit français de l'environnement, la notion de déchet obéit à une définition précise : est considéré comme déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » (art. L541-1 du Code de l'environnement).

Quel que soit l'état de ce qui est abandonné, réutilisable ou non, recyclable ou pas, la loi le considère donc comme un déchet. Le déchet dont on ne peut plus rien faire, celui qui n'est « pas susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » est lui appelé officiellement « déchet ultime ». Le déchet ultime, comme son nom l'indique est celui que l'on retrouve en fin de cycle, et où peut se concentrer le pire pour un déchet : totalement inutilisable, voire toxique !

Le droit français de l'environnement établit aussi une classification des déchets, en précisant par exemple ce qui définit un déchet dangereux. Une liste de déchets est ainsi officiellement établie et sert de référence juridique à tout ce qui les concerne : de leur production par les ménages, les collectivités ou les industries à leur élimination, en passant par leur transport, leur traitement, leur recyclage, etc.





matière. Comme toute matière, ils portent en eux tous les potentiels. Nous pouvons en faire du poison. Nous pouvons en faire du terreau de vie. Une question de choix de société, mais aussi de choix individuel. Une question de regard.

Un autre regard, c'est aussi ce que les déchets permettent de poser sur nos sociétés, depuis les origines. Les déchets sont les traces du vivant. Les déchets des hommes sont les traces de l'humanité. C'est sur les déchets de notre passé que s'est construite l'archéologie. Et l'exploration des déchets du passé nous apprend beaucoup sur qui nous fûmes. « Dis-moi ce que tu jettes et je te dirai qui tu es » est une phrase que l'on reprendra souvent et qui permettra de mieux comprendre l'histoire de notre relation à la matière, aux autres et au monde qui nous entoure.

Ce double regard objectif, qu'il soit celui que l'on porte sur les déchets ou celui que les déchets nous permettent de porter sur nous-mêmes, c'est le regard scientifique, aujourd'hui si souvent décrié, parfois diabolisé car associé à nombre de dérives technologiques. Mais force est d'admettre que l'on n'a pas encore trouvé mieux que la science pour comprendre. Et il est toujours nécessaire de comprendre pour agir.

Et puis la science, même celle des déchets, c'est d'abord la curiosité, la découverte et l'émerveillement. Oui, on peut être surpris et émerveillé dans le monde des déchets, puisque les déchets nous révèlent la face cachée de notre monde... des étoiles aux microbes.

■ Les déchets dans le collimateur de la science

Quand Sherlock Holmes fouille les poubelles : l'aventure de la rudologie

1973, université de Caen et université de Tucson dans l'Arizona : des deux côtés de l'Atlantique, deux chercheurs d'origines et de disciplines très différentes se passionnent pour les déchets ménagers. En France, c'est Jean Gouhier, un géographe sensible aux problématiques environnementales émergentes dans les années 1970, qui jette les bases de la rudologie, l'étude scientifique des déchets. Aux États-Unis, William Rathje est un archéologue spécialiste des civilisations précolombiennes. Quand il prend conscience que ce qu'il retrouve en fouille n'est autre que ce que les Mayas ont jeté, il décide d'appliquer les principes de l'archéologie à l'étude des déchets contemporains.



Être chercheur dans le domaine des déchets, c'est souvent à mi-chemin entre fouille archéologique et enquête policière !

Il nomme son approche la *garbology*, à partir du mot anglais *garbage* qui s'applique plutôt aux ordures ménagères. Indépendamment l'un de l'autre, les deux scientifiques élaborent des concepts et des méthodes semblables. L'idée de base ? Une analyse fine des déchets d'un groupe humain (une famille, un quartier, une ville) permet de comprendre son comportement, ses activités, ses pratiques, son niveau économique, culturel et social. C'est en fait une idée ancienne dans son principe, déjà utilisée par les agents du fisc pour débusquer des fraudeurs dont le train de vie ne correspond pas aux déclarations de revenus ! Les espions de tout poil savent aussi depuis longtemps que fouiller le contenu des poubelles peut permettre de récolter des informations très précieuses. Les méthodes développées par les chercheurs ? Les mêmes que celles des espions et des détectives : emporter les poubelles dans un laboratoire et tout sortir, tout peser, tout trier, tout classer, tout enregistrer.

En comparant ce qu'ils trouvent effectivement dans les poubelles et ce que les habitants déclarent avoir jeté, les chercheurs découvrent des écarts considérables : volontairement ou involontairement, on cherche souvent à cacher la réalité de sa consommation, de son mode de vie. Les déchets eux, ne mentent jamais... ils nous trahissent toujours.

Mais ce n'est pas tout. Jean Gouhier et William Rathje ont démontré que le travail de détective des rudologues ne permet pas que de s'immiscer dans les vies privées, il est avant tout un moyen scientifique extrêmement efficace pour définir une société, pour la décrire encore plus fidèlement que par les



Les poubelles françaises classées par la rudologie

À la fin des années 1980, le rudologue Jean Gouhier établit quatre catégories de poubelles à partir de ses travaux de recherche :

- les **poubelles de l'abondance** des beaux quartiers de la haute société. Elles recèlent, outre les emballages de produits de luxe, les témoignages des événements politiques et culturels et une presse diversifiée ;
- les **poubelles du choix possible** des quartiers d'habitat individuel aisé de la classe moyenne. Elles sont caractérisées par les témoins de la consommation abondante de fruits et légumes variés et de produits carnés frais ;
- les **poubelles du nécessaire** des grands immeubles locatifs de la classe populaire. On y trouve les traces de la consommation de masse (barquettes de viande, emballage de plats préparés...), peu de traces de produits frais et peu de journaux ;
- les **poubelles de l'indispensable**, des faibles revenus et des démunis, situés essentiellement en zones rurales à l'époque de cette étude. La quantité de déchets était assez faible et l'alimentation y laissait peu de traces.

indicateurs socio-économiques classiques. Un de leurs successeurs, Gérard Bertolini, directeur de recherche au CNRS, compare l'analyse des déchets selon les méthodes de la rudologie à l'analyse ADN : une véritable carte d'identité, en négatif, de nos quartiers, de nos collectivités, de nos territoires et de leurs structures, de leurs strates sociales, et de l'évolution des comportements.

Déchets, étoiles, microbes et machines à vapeur : le grand bazar de la thermodynamique

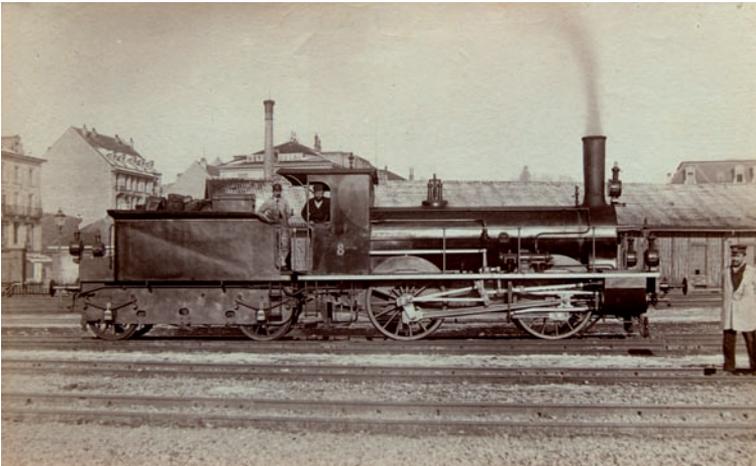
Un des concepts les plus remarquables de la rudologie est donc bien le fait que les déchets représentent une « empreinte digitale » presque parfaite du groupe ou de la société humaine qui les produit.

Ce concept, fondé au départ uniquement sur les observations expérimentales de Gouhier et Rathje, est en fait le résultat des lois de la physique. Pour nous en convaincre, plongeons-nous à nouveau dans les découvertes scientifiques des années 1970. Lors de cette décennie décidément riche pour notre compréhension de la science des déchets, un physicien belge, Ilya Prigogine, bouleverse la thermodynamique. La thermodynamique est, depuis la fin du XVIII^e siècle, la science de la chaleur et des machines thermiques. C'est elle qui a permis l'essor des machines à vapeur puis des moteurs à combustion actuels.



Jusqu'à Prigogine, elle s'applique essentiellement à la compréhension de la matière à l'équilibre sous toutes ses formes – les solides, les liquides, les gaz – et des mécanismes tels que le magnétisme ou la transformation de la chaleur en énergie mécanique. Que signifie « à l'équilibre » en thermodynamique ? Pour simplifier, il s'agit de l'état atteint au bout d'un temps suffisamment long par un système isolé, qui n'interagit pas avec son environnement. Par exemple, quand on verse de l'eau chaude et des cubes de glace dans une bouteille thermos et qu'on la referme, au bout d'un certain temps, il n'y aura dans la bouteille que de l'eau tiède, à la même température en tout point. L'eau aura atteint l'état d'équilibre thermodynamique. Il n'y a plus qu'un seul liquide à une température unique, uniforme, à la place d'une eau chaude dans laquelle baignent des cubes de glace à température négative. La coexistence de l'eau chaude et de la glace trahit un système hors équilibre, tandis que l'eau dans un seul état, liquide, et à une seule température est typique d'un système à l'équilibre.

Prigogine et ses successeurs montrent, quant à eux, que les grands mécanismes de l'univers, depuis le big bang jusqu'aux sociétés humaines sont en fait des processus très éloignés de l'équilibre thermodynamique. Ce sont, de plus, des processus qui créent de l'ordre dans l'univers. C'est une révolution scientifique. De nombreux physiciens opposent alors aux théories de Prigogine la seconde loi de la thermodynamique qui explique que tout système isolé ne peut que spontanément évoluer vers plus de désordre. Reprenons l'exemple de notre bouteille thermos : la seconde loi de la thermodynamique prédit ce qui va se passer. Le système constitué par l'eau chaude et les glaçons représente

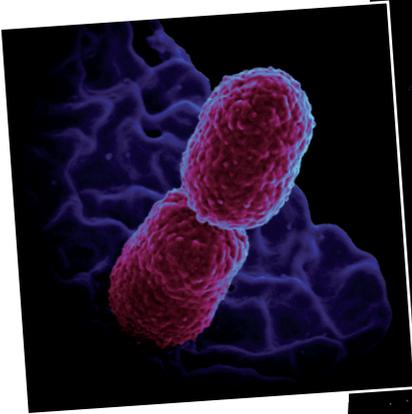


La thermodynamique, la science de la matière sous toutes ses formes, a accompagné pendant tout le XIX^e siècle la grande époque des machines à vapeur.



un certain niveau d'ordre, une certaine quantité d'information nécessaire pour décrire le système, la quantité de glace par rapport à la quantité d'eau, la taille et le nombre des glaçons, etc. Le système à l'équilibre, quant à lui, est beaucoup plus désordonné, désorganisé : on a besoin de beaucoup moins d'information pour le décrire car il n'y a plus qu'une forme d'eau. On a perdu toute information sur la quantité initiale de glace, sur le nombre de glaçons, etc. On a donc bien respecté la seconde loi de la thermodynamique : isolé, le système a évolué spontanément, naturellement, vers plus de désordre. Il a même évolué jusqu'à l'état de désordre maximal pour lui : son équilibre thermodynamique.

Alors, que signifie la découverte de Prigogine, découverte tellement importante qu'elle lui vaudra le prix Nobel de Chimie en 1977 ? Tout simplement que la plupart des systèmes que nous observons, les galaxies, les étoiles, les planètes, un grand nombre de mécanismes physiques et de réactions chimiques, mais aussi les êtres vivants, sont des systèmes non pas isolés mais ouverts sur leur environnement. La seconde loi de la thermodynamique ne s'y applique donc pas aussi simplement. Pour comprendre et analyser ces



Des galaxies aux bactéries, les structures dissipatives peuplent notre univers. Pour les comprendre, il faut faire appel aux lois de la thermodynamique hors équilibre.





systèmes, il faut les observer dans l'environnement avec lequel ils interagissent, échangeant en permanence de l'énergie et de la matière.

Ces systèmes, que Prigogine nomme « structures dissipatives » sont de véritables machines à transformer l'énergie et la matière qui proviennent de leur environnement et à fabriquer de l'ordre. Nous voyons tout de suite que notre bouteille thermos remplie d'eau chaude et de glaçons est tout sauf une structure dissipative, elle en est même l'exact opposé puisqu'elle n'échange ni matière ni énergie avec son environnement, et que par conséquent elle ne peut qu'évoluer vers l'équilibre thermodynamique, vers le désordre. Quelques exemples de structures dissipatives ? Les étoiles, qui transforment l'énergie gravitationnelle en rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire en lumière, en ultraviolets, en infrarouges, en rayons X, en ondes radio et en rayonnements ionisants ; les planètes, qui transforment elles aussi l'énergie gravitationnelle en rayonnement électromagnétique mais à beaucoup plus faible température que les étoiles, dans l'infrarouge, c'est-à-dire qu'elles rayonnent de la chaleur. Les tourbillons qui naissent dans les fluides en mouvement à grande vitesse sont aussi des structures dissipatives : un tourbillon dans l'eau n'est jamais constitué des mêmes molécules d'eau à deux instants différents, l'eau s'y écoule continuellement. Le tourbillon échange en permanence de l'eau avec son environnement, c'est ce qui lui permet de se maintenir sous la forme d'une structure, ordonnée, plus organisée que le reste de l'écoulement environnant. Une des caractéristiques de cette organisation de la matière au sein du tourbillon est son orientation bien particulière, l'eau tournant toujours dans le même sens au sein du même tourbillon.

La thermodynamique, l'entropie et le vivant

La thermodynamique, une branche de la physique, est la science des systèmes à l'équilibre. Elle a été élaborée au XIX^e siècle par les concepteurs de machines thermiques, à l'apogée de la vapeur. Mais depuis les travaux d'Erwin Schrödinger (1887-1961) et d'Ilya Prigogine (1917-2003), au milieu du XX^e siècle, la thermodynamique est appliquée aux systèmes biologiques. On a pu ainsi exprimer en termes thermodynamiques une des propriétés fondamentales du vivant : la capacité à s'auto-conserver, à maintenir en état sa propre structure interne et son propre fonctionnement.

D'un point de vue thermodynamique, tout se passe en effet comme si le vivant créait en permanence de l'ordre, ses propres structures sans cesse renouvelées, dans un univers qui tend spontanément vers de plus en plus de désordre.



Les thermodynamiciens Rudolf Clausius (1822-1888) puis Ludwig Boltzmann (1844-1906) ont élaboré la notion d'entropie, qui définit le degré de désordre d'un système. Quand on range sa chambre on diminue l'entropie de sa chambre, quand on répare sa voiture on diminue l'entropie de sa voiture ! Clausius et Boltzmann ont montré qu'un système physique isolé, c'est-à-dire qui n'échange ni matière ni énergie avec son environnement, ne peut qu'évoluer vers un état d'équilibre, le plus stable mais le plus désordonné. Un état où l'entropie, le degré de désordre, est maximale. C'est cette propension universelle au désordre

que l'on nomme la seconde loi, ou second principe, de la thermodynamique. Ce principe s'observe aisément au quotidien : si on ne fait aucun effort, si on ne dépense aucune énergie pour ranger, pour organiser, pour entretenir, pour réparer, tout autour de soi finit par ressembler à un gigantesque chaos ! Un autre exemple : une pile de livres, qui représente une première forme de rangement, est instable ; une pile de livres écroulée est beaucoup plus stable...



Sur la tombe du physicien Ludwig Boltzmann à Vienne, on peut lire la formule de l'entropie qu'il a élaborée dans les termes de la physique statistique, science dont il est le fondateur.

mais beaucoup moins ordonnée ; son entropie est supérieure à celle de la pile encore formée. Selon cette optique, un organisme vivant est un créateur d'ordre, un système qui s'auto-ordonne. Donc qui diminue lui-même son entropie. Ou, pour reprendre le terme de Schrödinger, qui crée de la néguentropie, de l'entropie négative. Pour accomplir cette prouesse thermodynamique, qui va à l'encontre de la tendance des systèmes isolés, le système-organisme doit être ouvert, c'est-à-dire parcouru par un flux continu de matière et d'énergie, et transférer un excédent d'entropie, de désordre, vers l'extérieur. C'est ce que Prigogine appelait une « structure dissipative ». Dissipative de quoi ? D'énergie ! En effet, pour se maintenir en vie, l'organisme doit consommer énormément d'énergie. Il doit aussi en permanence se maintenir éloigné de son état d'équilibre thermodynamique, ce qui le rend fragile et instable. Mais fragilité et instabilité sont des caractéristiques de la vie. Là encore, c'est la thermodynamique qui nous l'apprend : un organisme vivant ne se stabilise vraiment, ne se rapproche de l'équilibre thermodynamique, ne maximise son entropie... que quand il meurt ! À l'image de la pile de livres qui s'écroule.