

Entropie et énergie : le paradoxe

*Marc Halévy
Janvier 2008*

Selon le schéma thermodynamique classique, plus on chauffe un liquide, plus les vitesses moléculaires augmentent, plus vite diffusent les hétérogénéités et plus vite croît donc l'homogénéité : le liquide absorbe l'énergie venant de l'extérieur pour faire croître son entropie. Cela se traduit par la loi de Carnot-Clausius :

$\delta S = \delta Q/T$ (1) pour les systèmes réversibles et $\delta S > \delta Q/T$ pour les systèmes irréversibles.

A une température donnée, tout accroissement de l'énergie absorbée induit une croissance équivalente d'entropie.

A l'inverse si l'on "pompe" de l'énergie hors du système, son entropie va diminuer avec sa température et, s'il s'agit d'un liquide, il va, à un moment donné, cristalliser et engendrer de la néguentropie sous forme d'ordre cristallin.

Jusque là, tout est cohérent : la création de néguentropie (d'ordre) est liée à une déperdition d'énergie. C'est bien la loi de Carnot-Clausius.

Cependant, les systèmes vivants procèdent à l'inverse : ils doivent consommer (donc absorber) de l'énergie pour créer et maintenir de l'ordre, et pour contrecarrer le principe d'entropie maximale. Il y a donc paradoxe ...

*

Pour tenter de résoudre ce paradoxe, retournons aux fondamentaux.

L'énergie totale du système est la somme :

- de son énergie interne (c'est-à-dire le total des énergies accumulées par et entre ses constituants sous toutes les formes cinétiques, gravifiques, électromagnétiques (chimiques, essentiellement), hadroniques et leptoniques (nucléaires, donc),
- de son énergie cinétique macroscopique (les énergies cinétiques des composants microscopiques sont intégrées dans l'énergie interne et sont donc calculées par rapport au centre de gravité du système global)
- et du bilan total des flux d'énergie échangés avec le milieu sous ses diverses formes (matière, lumière, chaleur, champs de force, etc ...).

Si l'on veut bien appeler "énergie thermique" la somme des énergies cinétiques des constituants microscopiques internes, et "énergie structurantes" la somme de leurs énergies de liaison (selon les quatre modalités de force), il vient que le bilan énergétique global d'un système peut s'écrire :

$U_{TOT} = U_{CIN} + U_{THER} + U_{STRUC} - U_{ECH}$ (2) (le signe - de U_{ECH} indique seulement que ces énergies viennent du dehors du système).

En faisant l'hypothèse que l'on place le référentiel spatial global au centre de gravité du système étudié, il vient $U_{CIN} = 0$, ce qui simplifie l'équation mais empêchera, sauf correction idoine, d'étendre le raisonnement à un système plus large incluant celui-ci.

Si, enfin, l'on part d'un système bien délimité mais totalement vide, donc d'une énergie totale initiale $U_{TOT} = 0$, le premier principe fera que cette énergie totale restera nulle tout au long de la vie du système et que, donc, toute son énergie interne viendra de l'extérieur au fil des divers échanges avec le milieu.

L'équation devient alors : $U_{THER} + U_{STRUC} = U_{ECH}$; ce qui ne signifie rien d'autre que toute énergie extérieure entrante servira soit à augmenter l'énergie cinétique des constituants importés, donc à faire monter la température T moyenne globale du système, soit à engendrer des liaisons nouvelles, des structures nouvelles (donc, éventuellement, des propriétés émergentes), donc à faire diminuer le désordre mesuré classiquement, par l'entropie S .

On peut remarquer, dans ces conditions que l'équation (3) ci-dessus est bien équivalente à l'équation (1) du début. En effet, considérons la forme différentielle de cette équation dans l'hypothèse d'une température constante (donc $\delta U_{THER} = 0$), posons $\delta U_{ECH} = \delta Q$ et posons $\delta U_{STRUC} = \gamma \cdot \delta S$, il vient : $\delta Q = \gamma \cdot \delta S$

Reprenons l'exemple du liquide que l'on refroidit. On tire de l'énergie hors du système, donc $\delta U_{ECH} < 0$ ce qui a pour effet soit de diminuer U_{THER} , donc la température du système (ce que l'on observe bien hors changement de phase), soit de diminuer U_{STRUC} ce qui est contraire à l'expérience puisqu'au point de fusion, un cristal va apparaître au sein du liquide et engendrer un ordre supérieur accompagné de propriétés émergentes fortes.

Il ya donc bien là un paradoxe ...

Force est donc d'en déduire que l'on ne peut pas assimiler le concept d'entropie à l'inverse de la notion d'ordre. Ou alors, il faut donner à ce terme "ordre" une tout autre acception.

*

Le paradoxe thermodynamique s'exprime comme suit : lorsque l'on a affaire à un système mécanique, l'ordre croît (le liquide cristallise) et, donc, l'entropie décroît, en ôtant de l'énergie au système et, donc, en baissant sa température. L'ordre cristallin, en ce sens, est bien une solution inventée par la Nature pour dissiper mieux et plus vite les calories que le milieu tend à lui pomper.

Mais dans les systèmes organiques, c'est exactement l'inverse qui se passe : il faut apporter de l'énergie au système pour que les organisations complexes d'ordre biologique, puissent se mettre en place et se maintenir. Si l'entropie représente bien le degré de désordre du système, il faut alors convenir que, pour les systèmes organiques, l'entropie décroît avec l'apport d'énergie. Là est le paradoxe.

On pourrait parler, en quelque sorte, d'un ordre par le froid (celui de la cristallisation mécanique) et d'un ordre par le chaud (celui de l'autopoïèse organique). De deux choses l'une, ou bien le second principe de la thermodynamique ne s'applique qu'aux systèmes mécaniques et doit être largement généralisé pour convenir également aux systèmes organiques, ou bien l'interprétation classique de l'entropie comme mesure du désordre est fausse.

Ces deux issues n'en sont en fait qu'une seule car elles s'impliquent l'une l'autre.

*

Si l'on reprend la définition de Boltzmann de l'entropie, on a : $S = k \cdot \ln \Omega$ où k est une constante de proportionnalité et où Ω est une fonction qui donne le nombre de configurations microscopiques alternatives possibles pour constituer le même état macroscopique global du système. Si je dispose de quatre boules pour figurer les quatre sommets d'un carré donné, le nombre de configurations alternatives est $\Omega = 4! = 24$.

Dans un système donné, plus le nombre de liaisons entre les constituants est grand (donc plus le système est organisé, structuré, ordonné), moins il y a d'alternative possibles, plus la fonction Ω est petite et, donc, plus l'entropie est faible. En ce sens, l'entropie est donc bien la mesure du désordre au sein d'un système (si l'entropie est faible, cela signifie que le désordre est faible et donc que l'ordre est grand).

Dans un cristal, la maille élémentaire étant ce qu'elle est et correspondant à la configuration géométrique optimale d'agencement des ions, le nombre des configurations alternatives est très faible et, donc, la fonction Ω est petite ainsi que l'entropie : donc on a une entropie très faible ... pour un ordre très fort. C'est bien la thèse classique.

Mais, dans ce même cristal, tous les atomes sont interchangeables puisqu'ils sont tous identiques : le nombre de configurations atomiques identiques est donc énorme, et la fonction Ω y est donc très ... grande, ce qui donnerait une entropie très ... forte, pour un ordre très fort. Revoilà le paradoxe à l'œuvre !

Si, de plus, on considère une cellule vivante, c'est encore autre chose qui se passe : il n'y a que très peu de configurations alternatives des constituants qui puissent engendrer de la vie. La fonction Ω y est donc faible ce qui donnerait une entropie très faible ... pour un ordre très fort. On voit renaître, sous une autre forme, le paradoxe déjà décrit autrement ci-dessous.

*

Ce paradoxe reste une aporie tant que l'on reste sur l'identification de l'entropie à la mesure de l'ordre. Tant que l'on n'aura pas approfondi la notion d'ordre, précisément.

Le cristal est un ordre structurel (statique) qui est un agencement géométrique d'un grand nombre de (petits) constituants identiques.

La cellule est un ordre fonctionnel (dynamique) qui est un processus systémique d'un nombre plus restreints de (gros) constituants presque tous différents.

Dans les deux cas, le même mot "ordre" recouvre des notions fondamentalement différentes.

Il faut donc considérer que la notion classique d'entropie ne concerne que l'ordre structurel (fluidité/rigidité) et que le second principe de la thermodynamique ne s'applique pas aux systèmes fondé sur l'existence d'un ordre fonctionnel. Alors, et alors seulement, on peut dire que l'entropie mesure l'inverse de l'ordre structurel des systèmes mécaniques.

Pour le dire autrement, la thermodynamique classique ne concerne que les systèmes mécaniques (systèmes ordonnés), mais est inapplicable aux systèmes organiques (systèmes organisés) qui, eux, relèvent d'une autre logique énergétique et d'une autre conception de la notion d'ordre. CQFD.

*

* *