



HAL
open science

Entropie, sylviculture et écologie

L. Roussel

► **To cite this version:**

L. Roussel. Entropie, sylviculture et écologie. Revue forestière française, 1974, 26 (2), pp.130-134. <10.4267/2042/20815>. <hal-03395449>

HAL Id: hal-03395449

<https://hal.science/hal-03395449v1>

Submitted on 22 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ENTROPIE, SYLVICULTURE ET ÉCOLOGIE

L. ROUSSEL

Class. Oxford 161

Dans un système biologique complexe, tel que se présente une forêt, les arbres ont, avec le milieu qui les entoure, de continuels échanges de matière et d'énergie. Deux catégories d'entre eux sont reliés à des phénomènes particulièrement importants :

— la **photosynthèse**, dans laquelle l'énergie naturelle, captée par les feuillages, est utilisée à la photolyse de l'eau absorbée dans le sol par les racines, et à son union avec le gaz carbonique de l'air, pénétrant dans les feuilles, pour aboutir à la synthèse de divers glucides.

— la **respiration**, qui se déroule en sens inverse, par lente oxydation desdits glucides en libérant, dans le milieu extérieur les substances d'origine, et également une certaine quantité d'énergie. Ceci, dans des conditions de température partiellement contrôlées par la transpiration.

Il est donc normal que les physiologistes forestiers aient été tentés d'appliquer au système biologique « forêt » certains des principes qui ont fait leurs preuves en thermodynamique.

L'une de ces applications donne lieu, actuellement, à des discussions assez vives : c'est celle de la notion d'**entropie**, venant en droite ligne, il ne faut pas l'oublier, des principes de Carnot (1824), remaniés par Clausius (1854), et concernant le fonctionnement des machines thermiques. On peut rappeler, en quelques mots, que la variation de l'entropie (dS) d'un système est définie par le rapport entre la quantité de chaleur (dQ) fournie à ce système (ou retirée à celui-ci), et la température absolue (T) dudit système :

$$dS = dQ/T$$

En thermodynamique, cette notion est classique, et, à titre de simple exemple, on indiquera que si l'on fournit à 1 000 grammes d'eau la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 10° C à 20° C (soit approximativement 10 000 calories), l'accroissement de son entropie (dS) est donnée par la relation suivante, dans laquelle (m) est la masse d'eau, (C_s) sa chaleur spécifique, et (T_1) — (T_0) les températures absolues finales et initiales :

$$dS = 2,3 \cdot m \cdot C_s \cdot \log T_1 / T_0$$

$$\text{ou}$$

$$dS = 2,3 \cdot 1\,000 \cdot 1 \cdot \log 293/283 = 34,36 \text{ cal/}^\circ \text{K}$$

Le calcul inverse peut être fait : si l'on refroidit la même masse d'eau de 20° C à 10° C, son entropie diminue de 34,36 cal/° K.

Comment convient-il d'interpréter, d'une façon simple, la notion d'entropie ? On sait que Carnot avait fixé le rendement maximal théorique d'une machine à vapeur, pour une quantité quelconque de chaleur fournie à la chaudière, à $1 - T_0/T_1$. Ce rendement était ainsi d'autant plus élevé que le facteur T_0/T_1 était plus faible donc que T_0 (température absolue du condenseur) était plus basse, et que T_1 (température absolue de la chaudière) était plus grande. La notion de « qualité » de la chaleur était ainsi tout aussi importante que celle de « quantité » de chaleur. C'est ce que Brunhes a exprimé d'une façon imagée en faisant remarquer qu'une source thermale, qui apporte, par exemple, 90 000 Kcal par heure, des profondeurs de la terre à la surface du sol, est incapable, cependant, de faire cuire un simple œuf à la coque...

Etant donné le principe bien connu de l'équivalence entre la chaleur et l'énergie, Ponte et Brailard (1969), en exposant ces notions, sont ainsi conduits à définir l'entropie comme l'expression de la « roture » de l'énergie. A l'inverse, plus l'entropie diminue et plus l'énergie « s'anoblit ».

Une autre définition de l'entropie a été donnée par Boltzmann (1877) : elle est basée sur la théorie cinétique des gaz. On admet que les N molécules (environ 6.10^{23}), contenues dans une molécule-gramme d'un gaz, par exemple, sont, à une température un peu éloignée du zéro absolu, dans un état d'agitation thermique plus ou moins marquée, et remplissent donc, ainsi, la totalité du récipient dans lequel ce gaz est, éventuellement, renfermé. L'entropie de ce gaz est alors définie comme proportionnelle au logarithme de la probabilité thermodynamique de son état. Si (W) est la probabilité thermodynamique de l'état d'un gaz, (S) son entropie, (K) une constante et (\ln) le logarithme naturel de (W), on a la relation :

$$S = K \cdot \ln \cdot W$$

L'entropie ainsi calculée s'exprime par un nombre positif (si W est très grand), ou négatif (si W est très petit). Il est relativement facile d'approcher cette notion, d'une façon simplifiée, en calculant que la probabilité **mathématique**, pour qu'une seule molécule du gaz, dans le cas envisagé, soit, à un instant donné, dans une moitié déterminée du récipient qui le contient, est de $1/2$. Si l'on envisage 2 molécules, la probabilité mathématique de leur présence simultanée dans une moitié du récipient est de $1/2 \times 1/2 = 1/4$. Si l'on considère une molécule-gramme de ce gaz, la probabilité pour que toutes ces molécules soient rassemblées, au même instant, dans la moitié du récipient, est de

$$\frac{1}{26.10^{23}}$$

Mais, pour que l'état thermodynamique soit mieux uniformisé, il faut, **aussi**, que la vitesse de toutes les molécules (en valeur et en direction) soit identique. Cet état, on le conçoit, est hautement improbable, et sa probabilité thermodynamique voisine de zéro. Son logarithme (son entropie, au sens de Boltzmann) est négatif. A l'inverse, un état dans lequel toutes les molécules du gaz envisagé sont réparties, à un instant donné, dans l'ensemble du récipient, avec des vitesses variables et de directions quelconques, est extrêmement probable. Le logarithme de cette probabilité (son entropie, au sens de Boltzmann) sera positif et élevé.

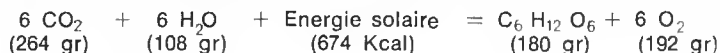
Or, et c'est ici que l'on passe des données purement physiques à des considérations biologiques, les êtres vivants ont, précisément, la faculté de rassembler, en des constructions stables, des molécules qui, sans eux, seraient dans un état d'agitation thermique tout à fait désordonné.

La vie pourrait donc d'une certaine façon, apporter de l'entropie négative, de la « néguentropie », dans cette sorte de chaos général et croissant des molécules de l'Univers.

Sur ce point, du reste, commencent immédiatement les discussions : que sont en réalité « le désordre » et « l'ordre » ? Aucune définition absolue n'en a encore été donnée. On préfère donc, actuellement, dire que le 1^{er} état est extrêmement probable, et que le 2^e état, est exceptionnel.

Pour en revenir aux végétaux autotrophes (et les arbres appartiennent tous à cette catégorie) on peut calculer la modification d'entropie qui résulte, soit de la photosynthèse, soit de la respiration, et ce, d'une façon assez simple. En effet, si, comme on l'a dit plus haut, en thermodynamique classique on se préoccupe surtout de déterminer les variations d'entropie (augmentation ou diminution), on dispose, depuis quelques années, de tables qui donnent, **en valeur absolue**, divers éléments (l'entropie en particulier) caractérisant diverses substances, dans des conditions dites « standard » : pression d'une atmosphère et température absolue de 298°K , soit 25°C . Cette température correspond assez bien, du reste, à celle de fonctionnement optimal, en été, de nombreux feuillages, pour la photosynthèse et pour la respiration.

La relation classique décrivant le phénomène endothermique de la photosynthèse est la suivante :



Exprimée en unités entropiques, dans les conditions « standard », cette relation devient, en arrondissant les chiffres :

$$306 \text{ cal} + 100 \text{ cal} + \dots\dots\dots = 50 \text{ cal} + 294 \text{ cal}$$

La modification de l'entropie du système vivant : un petit végétal placé dans une enceinte transparente isotherme éclairée et synthétisant 180 grammes de substances hydrocarbonées, est ainsi

de 344 cal (état final) moins 406 cal (état initial) soit : — 62 cal. **Cette modification est négative.** Il y a donc diminution de l'entropie, et organisation d'éléments divers, épars, en matière vivante cohérente. C'est bien ce qui a été indiqué plus haut. Mais, comment cette réduction d'entropie a-t-elle été possible ?

Pour certains biophysiciens, il s'agirait d'une propriété spécifique de la matière vivante qui agirait ainsi, à contre courant, en renversant la tendance générale des molécules de l'Univers vers un état d'entropie maximale. C'est la position de Schrödinger, par exemple, qui dans son célèbre petit ouvrage « What is life ? » (traduit en français en 1950) pense que cette faculté est caractéristique des molécules d'ADN, constituant de tous les chromosomes.

Par contre, d'autres scientifiques (l'excellent vulgarisateur Gamow, en particulier) estiment que les végétaux à chlorophylle reçoivent du soleil, en même temps que l'énergie libre de son rayonnement, une certaine quantité d'entropie négative. Ces physiciens font remarquer que si la **composition** du rayonnement solaire est celle d'un corps noir rayonnant à 6000° K, son **intensité**, à la surface de la terre, est près de 50 000 fois plus faible que celle émise à la surface du soleil ; d'où ses propriétés « néguentropiques ».

Il est à noter que, selon ces conceptions, la lumière artificielle (lampes ou tubes) doit posséder les mêmes caractères, puisqu'elle agit parfaitement dans la photosynthèse...

Considérons maintenant la respiration (et ceci concerne, non seulement les végétaux autotrophes, mais l'ensemble des êtres vivants) ; elle peut être considérée comme se déroulant en sens inverse de la réaction de la photosynthèse. Sa traduction, en unités entropiques, aboutit, pour 180 grammes de glucose oxydé, à une majoration de l'entropie de 62 calories. On « voit » mieux, ainsi, ce qui se passe : les molécules de gaz carbonique et d'eau, un moment fortement ralenties, ont repris leur agitation thermique antérieure ; l'arbre fonctionne alors comme une machine thermique ordinaire, et se conforme au principe très général défini par Clausius : « l'entropie de l'Univers tend vers son maximum ».

On peut cependant faire quelques remarques : les êtres vivants n'ont pas, seuls, la possibilité de concentrer en un lieu déterminé des substances inertes (des gaz, en particulier) qui, sans eux, seraient caractérisés par un état entropique élevé. Un morceau de chaux vive, par exemple, placé dans une enceinte contenant de l'air, va absorber peu à peu de la vapeur d'eau et du gaz carbonique, et se transformer en chaux éteinte, et en carbonate de calcium. Cette chaux vive va agir sur ces gaz en réduisant, peu à peu, leur libre circulation dans l'atmosphère, donc en allant à l'encontre de leur probabilité thermodynamique maximale. Certes, les états intermédiaires ne sont pas ceux réalisés dans la photosynthèse, mais en définitive, la chaux vive aura fixé, comme la feuille, l'eau et le gaz carbonique de l'air en une construction stable.

Un autre exemple peut être trouvé dans le phénomène de la cristallisation. Dans une solution de sucre, par exemple, ou de sel marin, à une concentration suffisante, l'introduction de quelques cristaux de ces corps va provoquer une fixation des molécules, circulant auparavant très librement dans le liquide solvant, et va donc aller également, à l'encontre de leur probabilité thermodynamique maximale.

Or, ni la chaux vive, ni le cristal de sel marin, ne sont considérés, par les biologistes, comme des organismes vivants.

Comme on le voit, cette question est assez complexe. Cependant divers auteurs ont déjà publié des résultats relatifs aux changements d'entropie (à l'occasion des phénomènes de photosynthèse, ou de respiration en particulier), dans des systèmes vivants variés. On peut citer Prigogine et Wiame (1945), Pilet (1956), Patten (1959), Galoux (1963) notamment.

Toutefois, lors d'un récent symposium sur la thermodynamique des systèmes vivants qui s'est tenu à Leningrad, en 1965, à l'Académie Forestière Kirov, sous la présidence du Professeur Yatsenko-Khmelevsky, deux opinions fort différentes ont été émises : le Professeur Syrnikov estimait que l'on avait tort d'élargir la notion d'entropie, d'origine purement mathématique, à des systèmes vivants, où ils perdent leur rigueur physique. Par contre, le Professeur Soloviev soutenait que cet usage était parfaitement licite, et que l'application de la notion d'entropie pouvait conduire à des conclusions fructueuses dans l'analyse des systèmes vivants.

Cet auteur rejoignait ainsi les conclusions de Spanner (1964), qui, dans un important ouvrage : « Introduction to thermodynamics », proposait de reconnaître que les systèmes vivants obéissent, comme les systèmes physiques, aux mêmes lois, pour tout ce qui concerne leurs échanges de matière et d'énergie. Ceci, tout en concédant que l'application de ces principes était parfois « quite difficult »...

C'est probablement la seule attitude scientifique à adopter, mais il faut reconnaître que, pour le moment, l'accord de l'ensemble des biophysiciens est loin d'être réalisé. On peut se demander aussi, à côté de ces discussions théoriques, quel peut être l'intérêt pratique de ce genre de recherches ? Remarquons qu'il y a, sans doute, une relation entre la vitesse de l'accroissement (ou de la diminution) de l'entropie d'un système vivant, et l'activité physiologique de celui-ci. C'est ce que pense Florov (1969) qui montre que, pour des peuplements de pin sylvestre, par exemple, le calcul de la vitesse de production d'entropie dans la respiration, donne de bonnes indications sur les caractéristiques bioclimatiques des diverses stations. Et Galoux (1971) qui étudie avec une grande précision les divers aspects des transferts d'énergie dans la chênaie mélangée de Virelles-Blaimont, estime utile d'inclure les calculs relatifs aux variations d'entropie, dans les éléments caractérisant, du point de vue thermodynamique, les écosystèmes forestiers.

Ce genre d'études se développe donc ; mais il faudra sans doute attendre de nombreuses années avant que ces notions nouvelles aient pu confirmer leur intérêt, et deviennent d'une utilisation plus fréquente en sylviculture.

La notion d'entropie se retrouve, également, dans un domaine en apparence très différent de la sylviculture, celui de l'informatique — bien que la première discipline commence à faire appel à la seconde. Mais, ce n'est pas exactement de cela qu'il s'agit. L'informatique est, on le sait, définie comme l'ensemble des méthodes de traitement de l'information.

Or, comme le font remarquer Ponte et Braillard (1969) : « L'incertitude étant l'état le plus probable où se trouve un système, l'information est un facteur « d'ordre » (sous réserve de ce qui a été dit plus haut à ce sujet), qui combat cette incertitude. » Il est bien évident que plus le degré de précision d'une information sera poussé, plus la probabilité pour qu'elle soit connue fortuitement sera faible. On voit ici l'analogie avec la probabilité pour qu'un gaz se trouve dans un état thermodynamique parfaitement déterminé. D'où la conclusion des auteurs : « L'énergie employée à créer de l'information est une énergie noble ; la connaissance qu'elle engendre anoblit le système. **L'information diminue donc l'entropie**, c'est de l'entropie négative, de la négentropie. »

Le langage des ordinateurs étant basé sur une représentation binaire des mots et des chiffres, ceci conduit à caractériser la qualité (élément subjectif) d'une information, par le nombre de ses « bits » (binary digits), qui constitue un élément impersonnel et permet de la définir. On pensera, par exemple, à la façon dont on arrive à la détermination d'une plante, en utilisant un tableau dichotomique : plus on avance dans ce tableau, et plus on acquiert de précision dans la définition de son nom.

Dépassant le stade de la plante, on peut considérer la réalisation d'un écosystème, forestier par exemple, avec ses multiples constituants, étroitement imbriqués les uns dans les autres, comme hautement improbable par le seul jeu de la rencontre, fortuite, des individus qui le composent. Quand un tel état existe, il se trouve, en quelque sorte, chargé d'une forte dose d'entropie négative. C'est un nouvel exemple de l'introduction de la notion d'entropie en écologie.

Ce point de vue n'est, cependant, pas universellement admis. Watt (1968), auteur d'un important « Traité d'écologie », utilise largement l'appareil mathématique et les méthodes de l'informatique, pour mieux cerner l'ensemble de ces problèmes, assurément fort complexes. Les notions d'information et d'entropie sont évoquées dans les parties de son ouvrage consacrées à la structure et à la stabilité des communautés ; en effet, Margalef (1957) a défini un « contenu d'information » (I), dans le cas d'un genre, par une relation du type suivant :

$$I = \log. \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_n!}$$

(N) représentant le nombre d'individus recensés dans le genre, et (N₁), (N₂) ... (N_n) les nombres d'individus recensés dans chacune des espèces représentées dans ce genre. Or, cette relation était fortement inspirée d'une théorie plus générale de Brillouin (1956) sur les ensembles et sous-ensembles, dans laquelle l'entropie (ou désordre) était exprimée sous la même forme que (I) dans la relation ci-dessus. On peut, du reste, étendre la notion de « contenu d'information » aux écosystèmes les plus variés.

Ainsi donc, selon ces auteurs, une sapinière pure et bien régulière du Jura, qui renferme très peu d'espèces végétales et animales, a un « contenu d'information » faible, donc une entropie réduite. Son « ordre » apparent, en partie artificiel du reste, s'accompagnerait d'un faible degré d'entropie. Ce qui, à première vue, pourrait paraître correct. Par contre, un taillis sous futaie mélangé de Champagne, riche en espèces végétales et animales, aurait un « contenu d'information » étendu, et, par voie de conséquences, un degré d'entropie élevé.

Mais cette définition particulière de l'entropie est contraire, évidemment, à celle qui résulte des commentaires de Ponte et Braillard cités plus haut. Ceci tient, sans doute, à ce que l'on confond ici, « l'ordre », notion purement subjective, et la « richesse d'information » qui peut être définie, en informatique, par le nombre de ses « bits », et ce d'une façon impersonnelle. En se basant sur cette dernière notion, c'est le taillis sous futaie qui aurait le degré d'entropie le plus bas, et la sapinière le degré d'entropie le plus élevé.

On peut estimer que c'est ainsi que raisonne Watt lorsque, d'une façon peut-être un peu ambiguë, il affirme que « l'emploi de cette notion d'entropie (celle de Brillouin-Margalef), en écologie, est malheureux ». Par contre, la notion de « contenu d'information » lui semble intéressante, comme bon indicatif du « degré d'organisation » des écosystèmes.

Les quelques lignes qui précèdent, que certains lecteurs jugeront sans doute fort imprécises, ou exagérément condensées, montrent cependant l'importance de la notion d'entropie qui, malgré certaines divergences d'opinion, transparait, comme en filigrane, dans de multiples aspects, en apparence fort éloignés, de la pensée scientifique moderne.

Louis ROUSSEL

Conservateur des Eaux et Forêts
en retraite

48, rue Courtalon
10000 TROYES

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BORY (C.). — La thermodynamique. — Paris, P.U.F., 1964. — 124 p. (Que sais-je ? n° 1119).
- FLOROV (R.I.). — L'entropie du feuillage comme index bioclimatique. *Cahiers de l'Association Française de biométéorologie*, 1969, pp. 18-24.
- GALOUX (A.). — Forêt, écosystème et cybernétique. *Bulletin de la Société royale forestière de Belgique*, n° 6, 1963, pp. 332-352.
- GALOUX (A.). — Flux et transfert d'énergie au niveau des écosystèmes forestiers. In : Productivité des écosystèmes forestiers, Actes du Colloque de Bruxelles (1969). — 1971, pp. 21-40.
- PILET (P.E.). — L'énergie végétale. — Paris, P.U.F., 1956. — 128 p. (Que sais-je ? n° 716).
- PONTE (M.), BRAILLARD (P.). — L'informatique. — Paris, Ed. du Seuil, 1969. — 190 p.
- SPANNER (D.C.). — Introduction to thermodynamics. — New York, London, Academic Press, 1964. — 278 p.
- WATT (K.E.F.). — Ecology and resource management. — New York, London, Mac Graw Hill Book Company, 1968. — 450 p.
- YATSENKO-KHMELEVSKY (A.A.) Ed. — Thermodynamics of living systems. Symposium held at Leningrad Kirov order Lenin forest academy, 27 april 1965. — Leningrad, Siège, 1966. — 75 p. (texte en russe, résumé anglais).

NAISSANCE DE L'O.F.E.T. (ORGANISATION FRANÇAISE POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA TELEDETECTION)

On désigne sous le nom de *télé-détection* l'ensemble des techniques permettant d'obtenir à distance, en général par survol aérien, des images de la surface terrestre ou des représentations de certaines caractéristiques de cette surface (photographies aériennes, images thermographiques, enregistrements radar, etc.).

L'interprétation de ces images, qui permet de recueillir des renseignements nombreux et précieux sur les zones représentées, nécessite une initiation et un entraînement que seuls des organismes très spécialisés peuvent fournir.

C'est pour répondre aux besoins pressants de formation d'utilisateurs de ces techniques et dans le but d'unifier cette formation que trois importants établissements français : l'Institut géographique national (I.G.N. - 136 bis, rue de Grenelle, 75700 Paris), l'Institut français du pétrole (I.F.P. - 1 et 4, avenue Bois-Préau, 92500 Rueil-Malmaison) et ses filiales, et le Bureau pour le développement de la Production agricole (B.D.P.A. - 202, rue de la Croix-Nivert, 75738 Paris Cédex 15), ont mis en commun leurs moyens d'enseignement et ont créé l'O.F.E.T.

Des stages d'objectifs et de durées variables vont être organisés chaque année par ces organismes. Tous renseignements peuvent être obtenus à leur sujet en s'adressant à l'un des trois établissements mentionnés ci-dessus.