

Sur les systèmes auto-organiseurs et leurs environnements *.

H. VON FOERSTER

*Département d'ingénierie électrique, Université d'Illinois,
Urbana, Illinois*

Avant d'entamer les quelques remarques introductives de mon intervention, je dois l'avouer, j'hésite un peu. Je crains en effet de blesser les généreux organisateurs de cette conférence consacrée aux systèmes auto-organiseurs. Et pourtant, je crois avoir une proposition de réponse à la question que posait le professeur Weyl dans sa propre introduction, si pertinente et intellectuellement si stimulante : « De quoi se constitue un système auto-organiseur ? » Aussi me pardonnerez-vous, je l'espère, de vous soumettre en préambule la thèse suivante : « Les systèmes auto-organiseurs, cela n'existe pas ! »

* Cet article est l'adaptation d'une intervention devant le Symposium Interdisciplinaire sur les Systèmes Auto-Organiseurs, prononcée le 5 mai 1959, à Chicago, Illinois ; publié à l'origine dans *Self-Organizing Systems*, M.C. Yovits et S. Cameron (ed.), Pergamon Press, Londres, pp. 31-50 (1960).

Au vu du titre de cette conférence, je me dois d'étayer cette thèse par des preuves convaincantes, une tâche qui ne devrait pas s'avérer trop complexe, pour peu que notre petite réunion n'ait pas pour intention secrète de fomenter un complot contre la Seconde Loi de la Thermodynamique. Je vais maintenant prouver la non-existence des systèmes auto-organiseurs par *reductio ad absurdum* de l'affirmation selon laquelle de tels systèmes existeraient bien.

Supposons un univers fini, U_0 , de la taille que vous voudrez, petit ou vaste (voir Fig. 1a), enfermé dans une enveloppe adiabatique qui sépare cet univers fini de tout « méta-univers » dans lequel il pourrait être immergé. Supposons ensuite que cet univers, U_0 , soit subdivisé par une paroi hermétique qui le scinde en deux parties mutuellement exclusives : l'une de ces deux parties est occupée en totalité par un système auto-organisateur, S_0 , tandis que l'autre constituerait l'environnement de ce système auto-organisateur : $S_0 \& E_0 = U_0$.

Je pourrais ajouter qu'il est sans importance que notre système auto-organisateur se situe à l'intérieur ou à l'extérieur de cette paroi hermétique. Notons toutefois que, dans la Fig. 1, le système est censé occuper l'intérieur de la paroi de séparation.

Il ne fait aucun doute que si on laisse ce système auto-organisateur s'organiser tranquillement pendant un petit

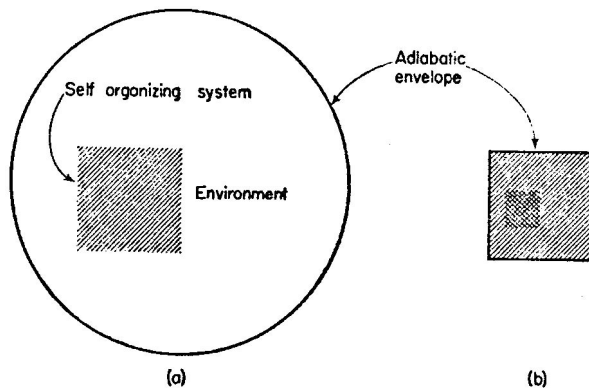


Figure 1

Légendes de la figure :

Système auto-organisateur

Environnement

Enveloppe adiabatique

moment, durant ce laps de temps, son entropie aura diminué :

$$\frac{\delta S_s}{\delta t} < 0,$$

sans quoi nous ne dirions pas qu'il s'agit d'un système auto-organisateur, mais simplement d'un système $\delta S_s / \delta t = 0$, ou d'un système thermodynamique $\delta S_s / \delta t > 0$. Pour y parvenir, il faut que l'entropie dans la partie restante de notre univers fini, c'est-à-dire l'entropie de cet environnement, ait augmenté de

$$\frac{\delta S_E}{\delta t} > 0,$$

faute de quoi nous violerions la Seconde Loi de la Thermodynamique. Ensuite, si certains des processus ayant contribué à la diminution de l'entropie du système sont

irréversibles, nous retrouverons l'entropie de l'univers U_0 à un niveau supérieur par rapport au moment où notre système a commencé de s'auto-organiser. Dès lors, l'état de l'univers sera plus désorganisé qu'avant $\delta S_u / \delta t > 0$. En d'autres termes, l'activité du système était bien désorganisatrice, et nous pouvons parler ici, à juste titre, de « système désorganisateur ».

Toutefois, on peut soutenir qu'il serait injuste de rendre ce système responsable des changements survenus dans tout l'univers, et que cette incohérence apparente résulte non seulement de l'attention portée à ce système proprement dit, mais aussi de la prise en considération de son environnement. En étendant trop l'enveloppe adiabatique, on risque d'y inclure des processus sans rapport avec notre discussion. Nous allons donc faire en sorte que l'enveloppe adiabatique coïncide avec la paroi hermétique qui séparait précédemment le système de son environnement (Fig. 1*b*). Cette étape ne va pas seulement invalider l'objection ci-dessus. Elle me permettra aussi de montrer qu'à supposer que cette enveloppe contienne le système auto-organisateur proprement dit, ce système se révèle non seulement un système désorganisateur, mais il devient même un système auto-désorganisateur.

Sur la base de cet exemple de la grande enveloppe, il est clair, ici aussi — dans le cas de processus irréversibles —, que l'entropie du système désormais inclus dans cette enveloppe

doit croître. Dès lors, avec le temps, le système se désorganisera — même si cette entropie a pu décroître dans certaines régions. On peut maintenant considérer que nous aurions dû limiter notre enveloppe à cette seule région, puisque c'est elle qui semble constituer la partie proprement auto-organisatrice de notre système. Pourtant, là encore, rien ne m'empêcherait d'appliquer l'argument de tout à l'heure, mais cette fois à une région plus petite, et l'on pourrait continuer ainsi éternellement, jusqu'à ce que notre système auto-organisateur se soit évanoui au paradis éternel de l'infinitésimal.

Malgré cette preuve que j'avance de la non-existence des systèmes auto-organiseurs, je propose de continuer d'employer cette formule du « système auto-organisateur », tout en sachant que ces termes finissent toujours par se vider de leur sens, à moins que le système ne soit en contact étroit avec un environnement *qui possède une énergie et un ordre disponibles*, et avec lequel il soit en interaction perpétuelle, de sorte qu'il réussisse en un sens à « vivre » aux dépens de son environnement.

Sans entrer dans les détails de l'intéressante discussion sur les flux d'énergie depuis l'environnement vers le système et retour, je peux brièvement évoquer les deux écoles de pensée associées à ce problème, celle qui considère le flux énergétique et la fluence comme une relation monocanal en symbiose

étroite (autrement dit, le message transporte aussi l'aliment ou, si vous préférez, signal et aliment sont synonymes), et l'autre école, qui sépare soigneusement les deux, même si l'on constate dans cette dernière théorie une interdépendance significative entre fluence et énergie disponible.

J'avoue que j'appartiens à la seconde école de pensée et je serai particulièrement heureux d'entendre M. Pask, tout à l'heure, dans sa communication intitulée « Histoire naturelle des réseaux » [*The Natural History of Networks*]², nous éclairer à ce sujet bien mieux que je ne saurais le faire moi-même.

Pour l'instant, ce qui m'intéresse tout particulièrement, ce n'est pas tant l'énergie de l'environnement ingérée par le système, mais son utilisation d'un ordre environnemental. En d'autres termes, la question à laquelle je voudrais répondre est celle-ci : « Si notre système est capable d'assimiler un certain ordre émanant de son environnement, jusqu'où peut aller cette assimilation ? »

Avant de traiter cette question, je dois évoquer deux autres écueils, tous deux relatifs à l'environnement. Vous aurez sans nul doute observé que, dans ma philosophie des systèmes auto-organiseurs, l'environnement de ces systèmes en constitue une condition *sine qua non*, qui m'impose de démontrer au préalable en quel sens nous évoquons l'existence de cet environnement. Ensuite, je dois montrer que, si un tel environnement existe, il doit posséder une structure.

Je vais déjà éliminer un premier problème, peut-être l'un des plus vieux problèmes philosophiques avec lesquels l'humanité ait été tenue de vivre. Il se pose quand, nous, les hommes, nous considérons nous-mêmes comme des systèmes auto-organiseurs. Je m'empresse de souligner ici que la simple introspection ne nous permet pas de décider si le monde tel que nous le voyons est « réel » ou s'il n'est qu'une fantasmagorie, un rêve, une illusion de notre imagination. La résolution de ce dilemme touche à notre discussion dans la mesure où — si cette dernière solution se vérifiait —, ma thèse originelle affirmant l'absurdité de la conception d'un système auto-organisateur isolé s'effondrerait lamentablement.

Je vais maintenant continuer en montrant la réalité du monde tel que nous le voyons, par *reductio ad absurdum* de la thèse suivante : ce monde n'existe que dans notre imagination et la seule réalité, c'est le « Moi » qui l'imagine.

La contribution artistique de M. Pask, qui a su magnifiquement illustrer ce point ainsi que d'autres, * facilitera mon argumentation.

Supposons pour le moment que je sois le brillant homme d'affaires à chapeau melon de la Fig. 2, et que j'insiste pour être la seule et unique réalité existante, tout le reste n'apparaissant que dans mon imagination. Je ne peux nier que, dans mon

* Figures 2, 5 et 6.

imagination, d'autres individus vont apparaître, des scientifiques, d'autres brillants hommes d'affaires, etc., par exemple dans le cadre de cette conférence. Comme je trouve ces apparitions à bien des égards similaires à ma propre personne, je dois leur accorder le privilège de pouvoir à leur tour affirmer qu'elles constituent la seule et unique réalité et que tout le reste n'est que le fruit de leur imagination. D'un autre côté, elles ne peuvent nier que leurs fantasmes soient peuplés d'autres individus — et que je pourrais être l'un d'eux, avec chapeau melon et tout le reste !

Sur quoi nous refermons le cercle de notre contradiction : si je suppose que je suis la seule et unique réalité, il s'avère que je suis le produit de l'imagination d'un autre, qui se considère à son tour comme la seule et unique réalité. Naturellement, ce paradoxe se résout aisément, en postulant la réalité du monde dans lequel nous vivons, prospères et heureux.

Une fois la réalité rétablie, il peut être intéressant de noter que cette réalité apparaît comme un cadre de référence permanent pour au moins deux observateurs. Cela relève de l'évidence quand on sait que ma « preuve » s'inspirait précisément du « Principe de Relativité ». Ce principe stipule grosso modo que si une hypothèse applicable à un ensemble d'objets se vérifie pour l'un de ces objets tout en se vérifiant pour un autre, alors elle se vérifiera pour les deux objets simultanément, hypothèse également valide pour tous les

objets de cet ensemble. Rédigée en termes de logique symbolique, nous aurons :

$$(Ex) [H(a) \& H(x) \longrightarrow H(a + x)] \longrightarrow (x)H(x) \quad (1)$$

Copernic aurait pu tirer profit de cet argument et faire remarquer que si nous défendons la thèse d'un système géocentrique, $[H(a)]$, rien n'empêcherait par exemple les Vénusiens d'avancer celle d'un système vénucentrique $[H(x)]$. Mais comme ne pouvons avoir les deux en même temps, le cycloïde à centre et l'épicycloïde, $H(a + x)$, quelque chose ne doit pas tourner rond dans notre système planétocentrique.

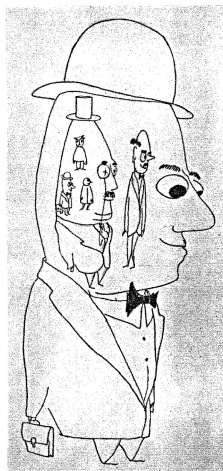


FIGURE 2.

Toutefois, n'oublions pas que l'expression ci-dessus, $\mathcal{R}(H)$ n'est pas une tautologie — autrement dit, cette formule a un

sens. * Son rôle est ici de nous permettre de mentionner l'existence d'un environnement.

Avant de pouvoir revenir à ma question originelle sur le degré d'assimilation dont un système auto-organisateur est capable vis-à-vis de son environnement, je dois montrer que le nôtre est, dans une certaine mesure, structuré. C'est très facile : il suffit d'observer que nous ne sommes manifestement pas encore dans l'état tant redouté de « mort thermique » cher à Boltzmann. Présentement, l'entropie continue de croître, ce qui signifie l'existence d'un certain ordre — du moins pour le moment —, sans quoi nous ne risquerions pas de le perdre.

Permettez-moi de brièvement résumer les points abordés jusqu'à présent :

(1) Par système auto-organisateur, j'entends cette partie d'un système qui se nourrit de l'énergie et de l'ordre émanant de son environnement

(2) Il y a une réalité de l'environnement au sens suggéré par l'acceptation du principe de relativité.

* C'est une observation de Wittgenstein,⁶ qui appliquait cette considération au principe de l'induction mathématique. Toutefois, la relation étroite entre l'induction et le principe de relativité paraît tout à fait évidente. Je m'aventurerais même jusqu'à dire que le principe de l'induction mathématique, c'est le principe de la relativité dans la théorie des nombres.

(3) Cet environnement est structuré.

Tournons-nous maintenant vers nos systèmes auto-organiseurs. Ce que nous attendons d'eux, c'est qu'ils accroissent leur ordre interne. Et tout d'abord, si l'on veut décrire ce processus, il conviendra de définir ce que nous entendons par « interne », et de déterminer ensuite si nous avons là un certain degré d'ordre.

Le premier problème se présente chaque fois que nous avons affaire à des systèmes qui ne sont pas enfermés dans une enveloppe. Dans ces cas-là, c'est à nous de définir la frontière fermée de notre système. Cela risque d'être source de problème, car si nous désignons une certaine région dans l'espace comme étant intuitivement le bon endroit où rechercher notre système auto-organisateur, il peut s'avérer que cette région ne possède aucune propriété auto-organisatrice, ce qui nous obligera à opter pour un autre choix, en espérant avoir cette fois plus de chance. C'est le type de difficulté que l'on rencontre par exemple avec la « localisation des fonctions » dans le cortex cérébral.

Évidemment, nous pourrions renverser l'argument en disant que nous définissons notre frontière à un instant donné comme l'enveloppe de cette région de l'espace où l'on constate l'accroissement d'ordre désiré. Mais ici nous nous heurtons de nouveau à un écueil : en effet, je ne connais aucun gadget capable de nous signaler s'il est connecté à une région auto-

désorganisatrice ou *auto-organisatrice*, et nous en fournir une définition opérationnelle valable.

L'autre difficulté tiendrait au fait que ces régions auto-organisatrices ne seraient pas constamment en mouvement dans l'espace et occupées à changer de forme. Il se peut qu'elles apparaissent et disparaissent spontanément, à tel ou tel endroit, obligeant ce gadget, cet « ordomètre », à suivre tous ces systèmes totalement insaisissables, mais aussi à détecter le lieu de leur formation.

Cette petite digression visait juste à souligner qu'il faut rester très prudents si l'on applique le qualificatif d'« intérieur » à ce contexte — même si l'on a établi la position de l'observateur, celui-ci risque d'avoir du mal à décrire ce qu'il voit.

Nous allons maintenant nous pencher sur un autre point déjà évoqué — tenter de cerner un degré d'ordre adéquat. J'ai personnellement le sentiment que ce terme vise à décrire deux états de choses différents. Premièrement, nous voulons rendre compte de relations apparentes entre éléments d'un ensemble, ce qui nous imposerait certaines contraintes quant à l'agencement possible des éléments de ce système. À mesure que l'organisation de ce système grandit, ces relations deviendraient de plus en plus apparentes. Deuxièmement, il me semble que cet ordre possède une connotation relative et non absolue, au vu du désordre maximum dont les éléments de

l'ensemble sont capables. On peut en conclure qu'il serait commode d'avoir une mesure d'ordre qui revêtirait des valeurs comprises entre le zéro et l'unité, traduisant dans le premier cas un désordre maximum et, dans le second, un ordre maximum. Ce qui élimine le choix de la « néguentropie » comme mesure de l'ordre : en effet, pour les systèmes en désordre complet, la néguentropie revêt toujours des valeurs finies. Toutefois, ce que Shannon ³ a défini comme la « redondance » me semble taillé sur mesure pour décrire l'ordre tel que je le perçois. En utilisant la définition que donne Shannon de cette redondance, nous obtenons :

$$R = 1 - \frac{H}{H_m} \quad (2)$$

où H/H_m serait le ratio d'entropie H d'une source d'information à la valeur maximale, H_m , qu'elle pourrait avoir tout en étant restreinte aux mêmes symboles. Shannon appelle ce ratio l'« entropie relative ». Il est clair que cette expression répond aux exigences d'une mesure de l'ordre dont j'ai déjà dressé la liste plus haut. Si le système est dans son état de désordre maximum, $H = H_m$, R devient égal à zéro ; alors que si les éléments du système sont organisés de telle sorte qu'un élément étant donné, il détermine la position de tous les autres, l'entropie — ou le degré d'incertitude — disparaît, et R devient l'unité, indicateur d'un ordre parfait.

Ce que nous attendons d'un système auto-organisateur, c'est évidemment, étant donné une valeur d'ordre initiale dans le système, que cet ordre s'accroisse avec le temps. Avec notre expression (2), nous pouvons tout de suite évaluer l'indice d'auto-organisation d'un système, à savoir que la vitesse de transformation de R doit être positive :

$$\frac{\delta R}{\delta t} > 0 \quad (3)$$

En différenciant l'équation (2) par rapport au temps et en recourant à l'inégalité (3), nous obtenons :

$$\frac{\delta R}{\delta t} = - \frac{H_m (\delta H / \delta t) - H (\delta H_m / \delta t)}{H_m^2} \quad (4)$$

Comme $H_m^2 > 0$, dans toutes les situations (à moins de commencer par des systèmes ne pouvant être pensés que comme étant toujours parfaitement ordonnés : $H_m = 0$), nous trouvons cette condition pour qu'un système soit auto-organisateur, exprimée en termes d'entropies :

$$H \frac{\delta H_m}{\delta t} > H_m \frac{\delta H}{\delta t} \quad (5)$$

Pour bien vous faire percevoir toute la portée de cette équation, permettez-moi d'abord de brièvement aborder deux cas particuliers, ceux où, dans chaque cas, l'un des deux termes

H, H_m est censé rester constant.

(a) $H_m = \text{const.}$

Considérons d'abord le cas où H_m , le maximum d'entropie possible du système, reste constant, car c'est celui que l'on se représente généralement quand on parle de systèmes auto-organiseurs. Si H_m est censé être constant, la dérivée temporelle de H_m disparaît, et nous avons, à partir de l'équation (5) :

pour

$$\frac{\delta H_m}{\delta t} = 0 \dots \dots \frac{\delta H}{\delta t} < 0 \quad (6)$$

Cette équation dit simplement qu'avec le temps, l'entropie du système devrait décroître. Nous le savions déjà — mais maintenant nous pourrions nous demander : comment y parvient-on ? Comme l'entropie du système dépend de la distribution de probabilité des éléments que l'on y trouvera dans certains états identifiables, il est clair que cette distribution de probabilité doit changer, de sorte que H diminue. Nous pouvons visualiser la chose et la manière dont elle s'effectue en étant attentifs aux facteurs qui déterminent cette distribution de probabilité. L'un de ces facteurs pourrait être que nos éléments possèdent certaines propriétés réduisant ou renforçant la probabilité que l'un d'eux se trouve dans un certain état. Soit par exemple l'état suivant : « se trouver dans un trou d'une certaine taille ». La probabilité de rencontrer des

éléments de plus grande taille que le trou considéré dans cet état est clairement égale à zéro. Dès lors, si l'on gonfle ces éléments, lentement, comme de petits ballons, la distribution de probabilité changera constamment. L'autre facteur influençant la distribution de probabilité serait que nos éléments possèdent certaines autres propriétés déterminant les probabilités conditionnelles pour que l'un de ces éléments se trouve dans certains états, étant donné l'état d'autres éléments dans ce système. Là encore, un changement de ces probabilités conditionnelles modifiera la distribution de probabilités et, partant, l'entropie du système. Comme tous ces changements prennent place de façon interne, je vais en attribuer la responsabilité à un « démon interne ». C'est lui qui, par exemple, se charge de souffler dans ces petits ballons et qui transforme ainsi la distribution de probabilité, ou qui modifie les probabilités conditionnelles en établissant entre éléments des liens tels que H décroîtra. Comme la mission de ce démon ne nous est pas inconnue, je vais le laisser tranquille pour le moment et me tourner à présent vers un autre démon, en abordant le second cas particulier déjà mentionné plus haut, où H est censé rester constant.

(b) $H = \text{constant}$

Si l'entropie du système est censée rester constante, sa dérivée temporelle disparaîtra et nous aurons, à partir de l'équation (5)

pour $\frac{\delta H}{\delta t} = 0 \dots \frac{\delta H_m}{\delta t} > 0$ (7)

Ce faisant, nous obtenons un résultat singulier : à en croire notre définition précédente de l'ordre, il se pourrait que nous soyons là en présence d'un système auto-organisateur, si son désordre maximum possible va croissant. À première vue, il semble qu'un tel résultat soit assez banal, car on imagine aisément les processus simples remplissant cette condition. Prenez l'exemple ordinaire d'un système composé de N éléments capables de revêtir certains états observables. Dans la plupart des cas, on calculera une distribution de probabilités pour le nombre d'éléments de ces états, comme le fait que H soit maximisé et que l'on obtienne une expression pour H_m . L'entropie (ou la quantité d'information) étant liée au logarithme des probabilités, on démontrera sans trop de difficulté que les expressions pour H_m respectent en général la forme suivante * :

$$H_m = C_1 + C_2 \log_2 N.$$

Ceci nous suggère immédiatement un moyen d'augmenter H_m , en ajustant progressivement le nombre d'éléments composant le système ; en d'autres termes, un système qui

* Voir aussi Appendice.

grandit en incorporant de nouveaux éléments accroîtra son degré maximum d'entropie et, comme cela remplit la condition pour qu'un système soit auto-organisateur (équation 7), nous devons, en toute justice, reconnaître à ce système son statut de membre de la famille distinguée des systèmes auto-organiseurs.

On pourra avancer que si le simple ajout d'éléments à un système suffit à en faire un système auto-organisateur, verser du sable dans un seau transformera ce dernier en système auto-organisateur. En un sens, cela semble peu digne — et c'est là un euphémisme — de la considération que nous inspirent spontanément les membres de notre illustre famille. Une réserve justifiée, tant il est vrai que cet argument ignore le principe dont est dérivé cet énoncé : lors de l'ajout de nouveaux éléments au système, l'entropie H de ce système doit rester constante. Dans le cas d'un seau rempli de sable, cela peut s'avérer délicat, mais cela reste une opération concevable, par exemple si l'on place les particules nouvellement admises très précisément dans le même ordre, par rapport à certains états repérables (leur position, leur direction, etc.) que celui des particules présentes à l'instant de l'admission des particules nouvelles venues. Il est clair que cette tâche d'accroissement de H_m (tout en maintenant H constant) requiert des aptitudes surhumaines. Par conséquent, nous allons peut-être faire appel à un autre démon, que j'appellerai le « démon interne ». Son

travail consistera à admettre dans le système uniquement les éléments dont l'état est au moins conforme aux conditions de l'entropie interne constante. Comme vous l'avez certainement remarqué, ce démon est un proche parent du démon de Maxwell, si ce n'est que de nos jours ces gaillards-là ne sont plus aussi efficaces que par le passé. En effet, avant 1927⁴, ils pouvaient surveiller la manœuvre en observant l'arrivée du nouveau venu par un petit trou arbitraire que devait franchir ce dernier et mesurer sa vitesse avec une exactitude d'une grandeur arbitraire. Aujourd'hui, en revanche, les démons qui surveillent de près un trou donné seraient incapables d'effectuer un test de vitesse fiable, et vice versa. Ils sont, hélas, limités par le principe d'incertitude d'Heisenberg.

Après avoir abordé ces deux cas particuliers où, chaque fois, un démon est à l'œuvre tandis que l'autre est enchaîné, je vais maintenant brièvement décrire la situation générale où deux démons sont libre de leurs mouvements, et me tourner donc vers notre équation générale (5), expression du critère définissant le caractère auto-organisateur d'un système selon deux entropies H et H_m . Par souci de commodité, on répétera ici cette équation, en indiquant simultanément les missions assignées aux deux démons D_i et D_e :

$$\begin{array}{ccccccc}
 H & \times & \frac{\delta H_m}{\delta t} & > & H_m & \times & \frac{\delta H}{\delta t} \\
 \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow
 \end{array} \quad (5)$$

Texte des colonnes 1 à 4
 Résultats du démon interne
 Tentatives du démon externe
 Résultats du démon externe
 Tentatives du démon interne

À la lecture de cette équation, nous comprenons aisément que, si les deux démons sont autorisés à travailler ensemble, cela leur facilitera énormément l'existence, bien plus que s'ils étaient forcés d'opérer seuls. Premièrement, il n'est pas nécessaire que D_i réduise à tout coup l'entropie instantanée de H , ou que D_e soit toujours occupé à augmenter l'entropie maximum possible H_m ; il suffit que le produit des résultats de D_i et des efforts de D_i soit plus grand que le produit des résultats de D_e et des efforts de D_i . Deuxièmement, si H ou H_m est grand, D_e ou D_i respectivement peuvent lever le pied, car leurs efforts seront multipliés par les facteurs appropriés. Ceci démontre, de façon pertinente, l'interdépendance de ces démons. En effet, si D_i est très occupé à accumuler un H de vastes dimensions, D_e peut se permettre d'être paresseux, car ses efforts seront multipliés par les résultats de D_i , et réciproquement. D'un autre côté, si D_e cède trop longtemps à la paresse, D_i n'aura plus rien sur quoi accumuler et son

rendement diminuera, forçant D_e à reprendre son activité, sous peine de voir le système cesser d'être un système auto-organisateur.

En plus de ce couplage entropique des deux démons, il existe aussi entre eux une interaction énergétique causée par les exigences énergétiques du démon interne, censé mener à bien les déplacements de distribution de probabilité des éléments composant le système. Ceci requiert une certaine énergie, comme on l'a vu dans notre exemple précédent, où un protagoniste devait souffler dans des petits ballons. Cette énergie ayant été prélevée dans l'environnement, elle affectera les activités du démon externe, qui sera peut-être confronté à un problème dès qu'il tentera de fournir au système une entropie du choix qu'il doit aller puiser dans un environnement pauvre en énergie.

Pour conclure cette brève exposition de ma démonologie, j'ai illustré au moyen d'un diagramme simple le double lien entre le démon interne et le démon externe, qui les rend interdépendants au plan entropique (H) et énergétique (E).

Pour quiconque veut aborder ce sujet du point de vue du physicien, conditionné à penser en termes de thermodynamique et de mécanique statistique, il est impossible de ne pas se référer à la superbe petite monographie d'Erwin Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie*.⁵ Ceux d'entre vous pour qui ce livre n'a pas de secret se souviendront

que Schrödinger admire tout particulièrement deux caractéristiques remarquables des organismes vivants. La première, c'est l'incroyable ordonnancement des gènes, ces « codes héréditaires », comme il les appelle, et l'autre, c'est la merveilleuse stabilité de ces unités organisées dont la structure délicate demeure presque intacte, malgré leur exposition à l'agitation thermique lors de leur immersion dans un thermostat, réglé à environ 310° Kelvin — par exemple dans le cas des mammifères.

Au cours de cette discussion captivante, Schrödinger attire notre attention sur deux « mécanismes » de base différents permettant de produire des événements ordonnés : « Le mécanisme statistique qui produit de l'ordre à partir du désordre et (...) [l'autre] qui produit de "l'ordre à partir de l'ordre". »

Si le premier mécanisme, le principe de « l'ordre à partir du désordre », se réfère purement aux « lois statistiques », ou, selon la formule de Schrödinger, à « l'ordre magnifique de la loi physique exacte qui découle du désordre atomique et moléculaire », le second mécanisme, le principe de « l'ordre à partir de l'ordre » est, pour reprendre encore ses propres termes, « le véritable indice de la compréhension de la vie ». Déjà, précédemment dans son texte, Schrödinger développe ce principe très clairement et souligne : « Un organisme se nourrit d'entropie négative ». Je crois que mes démons seraient

d'accord, et je le suis aussi.

Toutefois, en relisant récemment ce petit opuscule de Schrödinger, je me demandais comment ce que je considère comme le « second indice » de la compréhension de la vie ou — si j'ose dire — des systèmes auto-organiseurs, avait pu échapper à l'œil perçant du Nobel de physique 1933. Si le principe que j'ai en tête peut, à première vue, être confondu avec le principe de « l'ordre à partir du désordre » cher à Schrödinger, ils n'ont en fait rien de commun. De ce fait, pour souligner la différence entre les deux, je baptiserai ce principe que je vais vous présenter principe de « l'ordre à partir du bruit ». Ainsi, dans mon restaurant, les systèmes auto-organiseurs ne se nourrissent pas seulement sur commande : ils trouveront aussi du bruit au menu.

Permettez-moi, en recourant à un exemple presque trivial, mais plutôt amusant, de brièvement vous expliquer ce que j'entends par système auto-organiseur qui se nourrit du bruit.

Supposons que je me procure une feuille d'un matériau doté d'un champ magnétique permanent, fortement magnétisé perpendiculairement à sa surface, et que je découpe dans cette feuille un grand nombre de petits carrés (Fig. 3a). Je colle ces carrés sur toutes les surfaces de petits cubes faits de lumière, un matériau non-magnétique, qui possèdent des faces de même taille que mes carrés (Fig. 3b). En choisissant les faces des cubes dont le pôle magnétique nord est orienté vers l'extérieur

(Famille I), on créera très précisément dix familles différentes de cubes, comme indiqué Fig. 4.

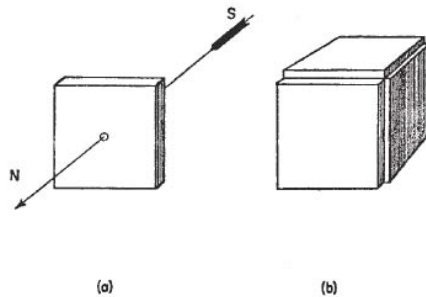


Figure 3. (a) carré magnétisé. (b) Cube, famille I

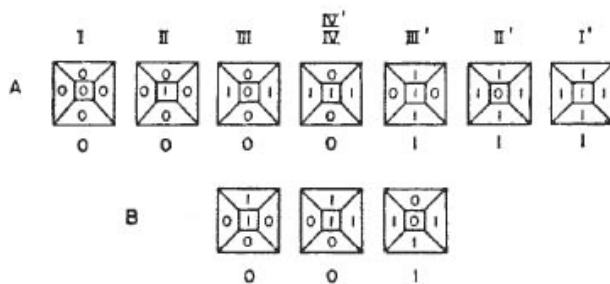


Figure 4. Dix familles de cubes différentes (voir texte).

Supposons maintenant que je prenne un grand nombre de cubes, disons, de la famille I, caractérisée par le fait que toutes leurs faces ont leur pôle nord orienté vers l'extérieur (ou la famille I', avec tous ses pôles sud orientés de la même manière), que je les range dans une grande boîte également remplie de minuscules billes de verre, où mes cubes flotteront par friction, et que je me mette à secouer cette boîte. Il ne va certainement

rien se passer de très notable : comme les cubes se repoussent tous les uns les autres, ils auront tendance à se distribuer dans l'espace disponible de telle sorte qu'aucun d'entre eux ne se rapprochera trop de son voisin. Si, en plaçant ces cubes dans cette boîte, aucun principe ordonnateur particulier n'a été observé, l'entropie du système demeurera constante ou, au pire, s'accroîtra dans une faible mesure.

Pour rendre ce petit jeu encore un peu plus amusant, supposons maintenant que je réunisse une population de cubes où seule la moitié des éléments serait encore des membres de la famille I (ou I'), tandis que l'autre moitié serait composée de membres de la famille II (ou II'), qui a pour caractéristique de n'avoir qu'une face de magnétisme différent orientée vers l'extérieur. Si cette population est placée dans ma boîte et si je continue de secouer, il est clair que les cubes dont un pôle est tourné vers l'extérieur tendront, avec une écrasante probabilité, à s'apparier aux membres de l'autre famille, jusqu'à ce que la quasi-totalité de mes cubes se soit rangée par paires. Comme la probabilité conditionnelle de tomber sur un membre de la famille II, étant donné la localisation des membres de la famille I, a fortement augmenté, l'entropie du système a diminué. Par conséquent, après avoir secoué cette boîte, nous avons davantage d'ordre qu'avant. Il est facile de démontrer *

* Voir Appendice.

que dans ce cas la quantité d'ordre dans notre système est passée de zéro à

$$R_{\infty} = \frac{1}{\log_2(en)},$$

si l'on a commencé avec une densité de population de n cubes par unité de volume.

Je vous l'accorde, c'est là un accroissement de l'ordre bien modeste, en particulier si la densité de population est élevée. Aussi allons-nous plutôt prendre une population entièrement composée de membres appartenant à la famille IVB, caractérisée par deux paires de trois faces à la polarité opposée qui se rejoignent par deux sommets opposés. Je place ces cubes dans ma boîte, et vous secouez le tout. Au bout d'un petit moment, nous ouvrons la boîte et, au lieu de voir un tas de cubes empilés en tous sens (Fig. 5), vous n'en croyez pas vos yeux, car il en ressort une structure à l'agencement incroyable qui, j'imagine, mériterait de figurer dans une exposition de sculptures surréalistes (Fig. 6).

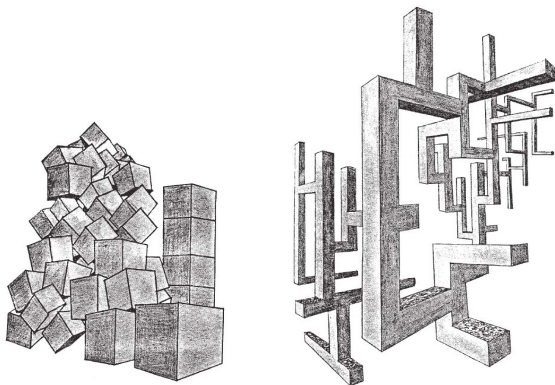


Figure 5. Avant.

Figure 6. Après.

Si je vous avais caché mon truc de la surface magnétique et si vous m'aviez posé la question — « Qu'est-ce qui a pu agencer ces cubes dans un ordre aussi remarquable ? » —, je serais resté de marbre et je vous aurais répondu : « Rien. Le simple fait d'avoir secoué la boîte, c'est tout » — sans oublier quelques démons, enfermés dans ladite boîte.

Avec cet exemple, j'espère avoir suffisamment illustré le principe que j'appelle « l'ordre à partir du bruit » — en effet, aucun ordre n'a été introduit dans ce système, rien qu'une énergie pauvre et non dirigée. Toutefois, au bout du compte, grâce aux petits démons de la boîte, seuls ont été retenus les composants du bruit qui contribuaient à l'accroissement de l'ordre dans le système. Une occurrence comme une mutation, par exemple, serait une analogie pertinente, si le système considéré était par exemple celui des gamètes.

Par conséquent, je nommerais deux mécanismes qui sont des indices importants pour la compréhension des systèmes auto-organiseurs. Nous pourrions appeler le premier le principe de « l'ordre à partir de l'ordre », comme le suggérait Schrödinger, et l'autre le principe de « l'ordre à partir du bruit ». Ils requièrent tous les deux la coopération de nos démons, dont la création va de pair avec celle des éléments de

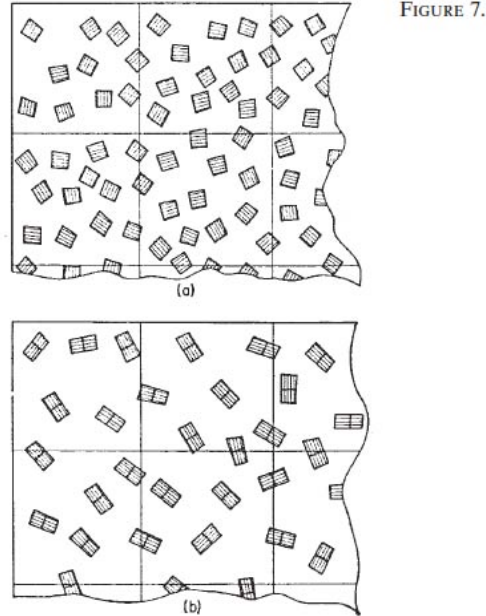
notre système, et qui sont manifestement à l'œuvre dans certaines propriétés structurelles intrinsèques de ces éléments.

On risque de m'accuser d'avoir présenté un cas de figure presque banal pour essayer de développer mon principe de l'ordre à partir du bruit. J'admets. Toutefois, si je n'avais pas dévoilé mon joli petit truc des surfaces magnétisées, je suis convaincu que je serais en bien meilleure posture. C'est pourquoi je suis très reconnaissant aux promoteurs de cette conférence d'avoir invité le professeur Auerbach⁶ qui va nous parler ici même de ses magnifiques expériences *in vitro* de réorganisation des cellules en organes prédéterminés après que ces cellules ont été complètement séparées et mélangées. Si le professeur Auerbach connaît le truc qui permet d'obtenir un tel résultat, j'espère qu'il ne le révélera pas. Car s'il gardait le silence, je pourrais avancer la thèse selon laquelle, sans rien savoir des mécanismes à l'œuvre, mon exemple n'était après tout pas si banal, et les systèmes auto-organiseurs conserveraient un peu de leur caractère miraculeux.

Appendice

L'entropie d'un système d'une taille donnée composé de N éléments indifférenciés se calculera en tenant compte que de la distribution spatiale des éléments considérés. Nous commençons par subdiviser l'espace en Z cellules de taille égale et par compter le nombre de cellules Z_i abritant i éléments

(voir Fig. 7a).



Manifestement, nous obtenons

$$\sum Z_i = Z \quad (i)$$

$$\sum iZ_i = N \quad (ii)$$

Le nombre de variations perceptibles du fait du nombre différent d'éléments présents dans les cellules est

$$P = \frac{Z!}{\prod Z_i!} \quad (iii)$$

à partir de quoi nous obtenons l'entropie du système pour un grand nombre de cellules et d'éléments :

$$H = \ln P = Z \ln Z - \sum Z_i \ln Z_i \quad (\text{iv})$$

Dans le cas d'une entropie maximum $\overline{H}$, nous devons avoir

$$\delta H = 0 \quad (\text{v})$$

en observant aussi les conditions exprimées dans les équations (i) et (ii). En appliquant la méthode des multiplicateurs de Lagrange, nous avons à partir de (iv) et de (v) avec (i) et (ii) :

$$\begin{array}{l} \sum (\ln Z_i + 1) \delta Z_i = 0 \\ \sum i \delta Z_i = 0 \\ \sum \delta Z_i = 0 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \beta \\ -(1 + \ln \alpha) \end{array} \right.$$

en multipliant par les facteurs indiqués et en additionnant les trois équations, nous remarquons que cette somme disparaît si chaque terme disparaît de manière identique. Ainsi :

$$\ln Z_i + 1 + i\beta - 1 - \ln \alpha = 0 \quad (\text{vi})$$

à partir de quoi nous obtenons cette distribution qui maximise H :

$$Z_i = \alpha e^{-i\beta} \quad (\text{vii})$$

Les deux multiplicateurs indéterminés α et β peuvent être évalués à partir des équations (i) et (ii) :

$$\alpha \sum e^{-i\beta} = Z \quad (\text{viii})$$

$$\alpha \sum ie^{-i\beta} = N \quad (\text{ix})$$

En se souvenant que

$$-\frac{\delta}{\delta\beta} \sum e^{-i\beta} = \sum ie^{-i\beta}$$

nous obtenons à partir de (viii) et (ix), après quelques manipulations :

$$\alpha = Z(1 - e^{-1/n}) \approx \frac{Z}{n} \quad (\text{x})$$

$$\beta = \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \approx \frac{1}{n} \quad (\text{xi})$$

où n , la population ou la densité cellulaire moyenne N/Z sera présumée assez grande pour obtenir de simples approximations. En d'autres termes, les cellules sont censées être assez grandes pour recevoir quantité d'éléments.

Après avoir déterminé les multiplicateurs α et β , nous sommes arrivés à la distribution la plus probable qui, après l'équation (viii), s'énonce désormais :

$$Z_i = \frac{Z}{n} e^{-i/n} \quad (\text{xii})$$

À partir de l'équation (iv), nous obtenons aussitôt l'entropie maximum :

$$\overline{H} = Z \ln(en). \quad (\text{xiii})$$

Clairement, si les éléments sont censés pouvoir fusionner par paires (Fig. 7b), nous aurons

$$\overline{H}' = Z \ln(en/2). \quad (\text{xiv})$$

En mettant en équation $\overline{H}$ avec H_m et $\overline{H}'$ avec H , nous avons la quantité d'ordre après fusion :

$$R = 1 - \frac{Z \ln(en)}{Z \ln(en/2)} = \frac{1}{\log_2(en)} \quad (\text{xv})$$

Références

N.B. L'appel de note 1 n'existe pas dans ma V.O.

L. Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, paragraphe 6.31, Gallimard, 2001.

² G. A. Pask, « The natural history of networks ». Dans ce volume, p. 232.

³ C. Shannon et W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, p. 25, University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1949.

⁴ W. Heisenberg, *Z. Phys.* **43**, 172, 1972.

⁵ E. Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?*, Points, Seuil, 1993.

⁶ R. Auerbach, « Organization and reorganization of embryonic cells ». Dans ce volume, p. 101.

Discussion

Lederman (*Université de Chicago*) : Je me demande s'il est juste de dire que dans votre définition de l'ordre, vous visez en réalité la probabilité conditionnelle et non simplement un ordre au sein d'un système donné, car, suivant votre définition de l'ordre, pour un nombre donné d'éléments, cet ordre sera plus grand dans un système où le contenu de l'information est en réalité plus petit, qu'il ne le sera pour d'autres systèmes.

Von Foerster : Parfaitement exact. Ce que j'ai essayé de faire ici en arrêtant un certain degré d'ordre, c'était de suggérer la redondance comme une mesure. Ce qui est d'un maniement simple. À partir de là, je peux dériver deux formulations relatives à H_{max} et à H . Bien sûr, je ne considère pas cela comme une interprétation universelle de l'ordre en général. Ce n'est qu'une suggestion, qui peut être utile ou non.

Lederman : Je pense que c'est une bonne suggestion, mais qui est surtout très bonne si on la considère comme une sorte de probabilité conditionnelle. Elle aurait davantage de sens si l'on considérait les probabilités conditionnelles comme changeantes, de sorte que l'un des éléments, pour un état environnemental donné, soit isolé comme une forte probabilité.

Von Foerster : Oui, si vous changez H , il y a plusieurs manières

d'y parvenir. On peut modifier la probabilité conditionnelle. On peut changer aussi la distribution de probabilité, ce qui est peut-être plus facile. C'est tout à fait juste.

Maintenant, la question est évidemment de savoir de quelle manière on peut y arriver ? On peut y parvenir, je crois, si ces entités possèdent une structure interne susceptible d'être organisée.

Lederman : Je crois que vous arriverez à ce résultat à partir de votre expression mathématique initiale du problème, formulé en termes de H et H_{max} , au sens où vous pouvez accroître l'ordre de votre système en réduisant le bruit de ce même système, ce qui augmente H_{max} .

Von Foerster : C'est exact. Mais il se peut que nous ne parvenions pas à aller au-delà d'un certain niveau. D'un autre côté, je crois bon de conserver un certain bruit dans le système. Si un système se fige dans un état particulier, il devient inadapté, et cet état final risque d'être complètement inadéquat. Il sera incapable de s'adapter à une situation autre, qui serait éventuellement plus appropriée.

Lederman : C'est vrai, mais je crois, s'agissant du parallélisme entre votre démarche mathématique et le modèle que vous nous avez proposé concernant ces aimants qui se magnétisent tout seuls, que dans une approche mathématique vous pourriez accroître le contenu de l'information en

réduisant le bruit et, de même, dans votre système, quand vous voyez les aimants s'organiser d'eux-mêmes en une sorte de structure, vous avez aussi diminué le bruit du système avant d'avoir atteint le stade où vous pouviez dire « Ha-ha, il y a de l'ordre dans ce système ».

von Foerster : Oui, c'est juste.

Mayo (*Loyola University*) : Comment le bruit peut-il contribuer à l'apprentissage humain ? Le bruit n'équivaut-il pas au non-sens ?

Foerster : Ah ça, oui, absolument. (*Rires*). Eh bien, la distinction entre bruit et non-sens m'intéresse au plus haut point, vous l'imaginez. Elle désigne en général un cadre de référence. Prenons par exemple l'apprentissage d'un chien. Il serait conseillé de recommencer sans relâche une seule et même chose, et en même temps, me semble-t-il, dans l'apprentissage et le dressage d'un animal, il faudrait aussi permettre au système de rester adaptable, veiller à inculquer l'information de manière à ce que le système, dans toutes les situations qui se présentent, soit amené à vérifier si une hypothèse donnée fonctionne ou non. Cela ne peut s'obtenir que si la nature dans laquelle le système est immergé n'obéit pas à un déterminisme absolu, si elle connaît certaines fluctuations. Ces fluctuations peuvent être interprétées sous de nombreuses formes différentes. Elles peuvent être interprétées

comme étant du bruit, comme des éléments dépendant du cadre de référence particulier dont nous parlons.

Par exemple, quand je donne un cours, si je veux que mes étudiants retiennent un sujet en particulier, j'introduis une erreur dans mon exposé, ce qui les fait réagir : « Monsieur, vous avez commis une erreur ». Et je leur réponds : « Ah oui, j'ai commis une erreur. » Mais ils retiendront bien mieux le sujet en question que si je n'en avais commis aucune. Et c'est pourquoi je suis convaincu que si vous voulez réussir un certain apprentissage, un environnement comportant une quantité de bruit raisonnable ne sera pas une trop mauvaise chose.

Reid (*Montreal Neurological Institute*) : J'aimerais entendre le professeur von Foerster commenter la thermodynamique des systèmes auto-organiseurs.

von Foerster : Vous n'avez pas précisé « systèmes ouverts » ou « fermés ». C'est une question extrêmement importante, une question très intéressante, et il faudrait sans doute créer un cursus de deux ans sur la thermodynamique des systèmes auto-organiseurs. Je crois que Prigogine et d'autres ont abordé le problème du système ouvert. Pour ma part, je m'intéresse beaucoup à quantité d'aspects de la thermodynamique des systèmes auto-organiseurs, car cela constitue un champ complètement neuf.

Face à un système qui ne contient que mille, dix mille ou cent

mille particules, on rencontre des difficultés dans la définition de la température. Par exemple, dans un chromosome ou un gène, vous aurez une molécule complexe comprenant autour de 10^6 particules. Maintenant, quelle est la validité de la thermodynamique de 10^6 particules ou de la théorie développée à l'origine pour 10^{23} particules ? Si cette réduction de 10^{17} est valide, au sens où l'on peut encore parler de « température », il y a moyen d'aborder le sujet. Il y a une approche que l'on peut adopter, et c'est celle de la théorie de l'information. Toutefois, il subsiste un problème : dans la théorie de l'information, vous n'avez pas de constante de Boltzmann. Et c'est, hélas, un obstacle majeur.