

**Revue Internationale de**

ISSN 0980-1472

**systemique**

SYSTÈMES HIÉRARCHIQUES ET COMPLEXITÉ

Vol. 5, N° **1**, 1991

**afcet**

**Dunod**

**AFSCET**

**Revue Internationale de**  
**systemique**

**Revue**  
**Internationale**  
**de Sytémique**

volume 05, numéro 1, pages 53 - 60, 1991

Hiérarchie de niveaux d'organisation biologique,  
processus de complexification  
et géométries fractales

Francis Bailly, Françoise Gaill, Rémy Mosseri

Numérisation Afscet, janvier 2016.



Creative Commons

- [10] E. BERNARD-WEIL, *Précis de Systémique Ago-Antagoniste. Introduction aux Stratégies Bilatérales. L'interdisciplinaire*, Limonest, 1988.
- [11] E. BERNARD-WEIL, Les thérapeutiques bipolaires, *Rev. Intern. Systém.*, 2, 1988, p. 399-416.
- [12] E. BERNARD-WEIL et D. CLAUDE, Control in general or function models (example of the model for the regulation of agonistic antagonistic couples), in *Congrès Européen de Systémique*, Lausanne. AFCET/INFORGE, I, 1989, p. 473-484.
- [13] Y. BURNOD, Niveaux d'organisation du cortex cérébral, in *9<sup>e</sup> Séminaire de l'École de Biologie Théorique*, P. CRUIZIAT éd., 1989 (à paraître).
- [14] P. DELATTRE, Direct and inverse regulation control in transformation systems, *Math. Biosc.*, 34, 1981, p. 303-324.
- [15] M. DAERON et W. H. FRIDMAN, Towards an isotopic network, *Ann. Immunol.* (Institut Pasteur), 1985, 136 C, 383.
- [16] A. DUCROCQ, *L'Objet Vivant*, Stock, Paris, 1989.
- [17] P. NELSON et E. BERNARD-WEIL, Justification d'un modèle ago-antagoniste, *Int. J. Biomed. Comput.*, 11, 1980, p. 145-162.
- [18] G. PINSON, A. DEMAILLY et D. FAVRE, *La pensée. Approche holographique*, Presses Universitaires de Lyon, Lyon, 1985.
- [19] R. THOM, *Esquisse d'une Sémiophysique*, Interéditions, Paris, 1988.
- [20] R. VALLÉE, Subjectivité et systèmes, in *Perspectives Systémiques I*, B. PAULRE éd., L'interdisciplinaire, Limonest, 1989.

## HIÉRARCHIE DE NIVEAUX D'ORGANISATION BIOLOGIQUE, PROCESSUS DE COMPLEXIFICATION ET GÉOMÉTRIES FRACTALES

F. BAILLY \*, F. GAILL \*\*, R. MOSSERI \*

\* Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue, C.N.R.S. <sup>1</sup>

\*\* Centre de Biologie Cellulaire, E.P.H.E. C.N.R.S. <sup>2</sup>

### Résumé

L'analyse de la nature et du rôle des *niveaux d'organisation biologique* conduit à associer leur présence à celle de géométries et de propriétés fractales affectant les structures biologiques qui en sont le support et qui assurent l'intégration de parties dans un tout ainsi que leur régulation mutuelle. De même la genèse de telles structures est associée à des dynamiques dont les attracteurs essentiels (censés assurer les conditions du fonctionnement proprement dit, c'est-à-dire le couplage effectif entre aspect structurel et aspect fonctionnel) sont de nature fractale (dans l'espace des phases correspondant).

### Abstract

Generally the characterization and the appearance of levels of organization in biology are to be associated with the existence of fractal geometry regarding the biological structures which ensure the integration and the regulation of the parts into the considered whole. In the same way, the genesis of such structures is to be associated with dynamics which are supposed to lead to actual coupling between structure and function in order to enable the biological functioning itself. The attractors of these dynamics are also fractal objects in the relevant phase space.

1. 1, place Aristide-Briand, 92195 Meudon Cedex.

2. 67, rue Maurice-Günsbourg, 94200 Ivry-sur-Seine.

## Introduction

Nous nous proposons principalement dans cet article de discuter comment et pourquoi des géométries fractales concrètes (déployées dans l'espace ordinaire) ou plus abstraites (attracteurs dans des espaces de phase) peuvent constituer à la fois des indices et des moyens de changement de niveaux d'organisation biologique. Par exemple, pour l'aspect concret de la cellule à l'organe ou de l'organe à l'organisme ou encore, pour l'aspect dynamique abstrait, dans la genèse de structures biologiques par multiplication cellulaire ou dans le processus de différenciation fonctionnelle entre lignées cellulaires<sup>3</sup>.

Nous serons donc amenés pour commencer à caractériser de façon opératoire, au moins approximativement, ce que l'on peut entendre structurellement et fonctionnellement par niveau d'organisation biologique et hiérarchie de tels niveaux. Ce sera l'objet de la première partie.

Dans la deuxième partie nous discuterons plus précisément la place que tiennent et le rôle que jouent les géométries fractales d'objets biologiques (interfaces, ramifications arborescentes) dans les processus d'échange, de régulation, d'intégration. Nous montrerons qu'on peut les considérer comme les seuls types de structures permettant de concilier des exigences à première vue incompatibles entre elles et néanmoins nécessaires (extensions maximales des systèmes membranaires ou vasculaires, encombrements stériques limités, homogénéité globale d'un organe individué) et ainsi de constituer des hiérarchies de niveaux intégrant des parties dans un tout organique.

La troisième partie sera consacrée à la question de la dynamique sous jacente censée gouverner la genèse de ces structures différenciées et leur mise en place fonctionnelle (mitoses cellulaires, différenciations entre lignées). Nous considérerons le processus d'établissement du rapport entre structure et fonction sous l'angle d'une complexification modélisée par un système dynamique tendant vers un attracteur étrange (de dimension fractale) dans l'espace de phase, la proximité de l'attracteur caractérisant alors la possibilité du fonctionnement proprement dit.

3. Précisons pour éviter toute confusion que le caractère hiérarchique considéré ici ne se rapporte en rien à la structure intrinsèque des objets fractals considérés (qu'ils soient ou non self-similaires) ni à leurs éventuelles échelles internes. Les fractals interviennent ici non pour eux-mêmes mais comme indices ou comme instruments de hiérarchisation ou de changement de niveaux qu'ils rendent possibles.

## 1. Niveaux d'organisation

Comme nous venons de le souligner, les niveaux d'organisation que nous considérons ne sont pas de simples changements d'échelles qui permettraient par exemple de discerner des détails qui resteraient inaccessibles à une autre échelle. Ce ne sont pas non plus seulement des degrés d'analyse dans une démarche strictement réductionniste où des interactions d'un degré donné se comprendraient en termes de moyennes statistiques d'interactions plus fines à un degré moins élevé; ni la juxtaposition d'imbrications plus ou moins interagissantes de tels degrés appartenant à des structures séparées et autonomes. Il s'agit bien plutôt de niveaux de régulation et d'intégration par quoi des parties contribuent à un tout à travers les fonctions qu'elles y remplissent et qui, en retour, voient leur existence et leur fonctionnement conditionnés par la subsistance de ce tout auquel elles participent [cf. par exemple Atlan (1987)]. C'est le cas des organes dans l'organisme mais aussi celui des cellules dans les organes, des organites, dans les cellules, voire des macromolécules pour ces organites [Bailly, Gaill, Mosseri (1988)].

Nous ne nous étendrons pas longuement sur l'analyse et la caractérisation opératoire de tels niveaux [cf. Bailly (1989); Tardieu, Gaill (1989) pour une discussion plus approfondie] et nous nous contenterons de préciser les deux critères principaux qui permettent de les définir et de les discerner dans les objets d'étude. Pour qu'il y ait changement de niveau au sens qui nous intéresse ici il faut :

(i) qu'une grandeur intensive au moins du système considéré devienne infinie (ou pratiquement très grande par rapport aux ordres de grandeur pertinents pour le système),

(ii) que cette divergence d'une propriété (ou cette discontinuité de la propriété intégrale) s'accompagne d'un changement d'objet pertinent pour la description empirique et théorique du système.

Ces deux critères doivent être vérifiés simultanément pour qu'on ait affaire à un changement de niveau d'organisation dans l'acceptation que nous avons retenue. En effet, la discontinuité d'une propriété ne suffit pas si elle ne se couple pas à une réorganisation du système au niveau supérieur qui en transforme la nature; de même, une moyenne statistique (comme en thermodynamique de l'équilibre par exemple où les objets théoriques et empiriques pertinents se trouvent en effet modifiés — température ou pression au lieu de molécules et de chocs) ne suffit pas si elle n'est pas associée à des divergences ou des discontinuités de propriétés qui marquent des transitions qualitatives.

Considérés sous un angle physique [par exemple Stanley (1971)] ces critères correspondent à la présence de phénomènes critiques accompagnés, au cours de la transition critique, de renormalisation affectant des éléments interagissants : la criticité est liée à la divergence (on peut l'exprimer de façon illustrative en disant qu'à cette occasion une cause infinitésimale peut entraîner un effet fini, ou qu'une cause finie peut entraîner un effet infini) et le changement d'objet pertinent pourrait évoquer une suite de renormalisations associée à l'accumulation de tels événements critiques.

On conçoit alors que des géométries fractales (considérées comme supports bornés d'éléments métriques partout infinis) puissent à la fois faciliter concrètement, dans l'espace réel, ces transitions de niveaux (en offrant au fonctionnement des conditions très spéciales et conformes aux exigences du phénomène) et se prêter à un traitement particulièrement adéquat en vue de les modéliser et de représenter la dynamique de leur mise en place.

## 2. Structures fractales concrètes

Comme nous l'avons longuement discuté par ailleurs [Bailly, Gaill, Mosseri (1988) et (1989a)], les structures biologiques présentant des caractères de fractalité sont le plus souvent associées à des fonctions vitales d'intégration et de régulation (par exemple des fonctions physiologiques dans les rapports entre niveau de l'organe et niveau de l'organisme). Citons les sites biologiquement actifs à la surface de macromolécules ; les membranes et organites cellulaires (mitochondries, reticulum endoplasmique) ; les organes physiologiques (membrane alvéolaire du poumon, cortex cérébral, villosités intestinales, systèmes nerveux, bronchique, vasculaire, etc.). En général ces structures se présentent soit comme des interfaces de dimension topologique égale à 2 et de dimension métrique comprise entre 2 et 3, soit comme des réseaux arborescents de vaisseaux et conduits dont l'exposant de diamètre est différent de 2 [pour des précisions sur ces notions voir Mandelbrot (1982)]. Dans tous les cas on aboutit à des propriétés métriques infinies distribuées de façon plus ou moins homogène sur des ensembles qui demeurent bornés dans l'espace.

Ces particularités s'expliquent bien si l'on considère que les structures concernées sont engagées dans la réalisation de processus d'échanges interfaciaux ou de transports pour l'efficacité et le contrôle desquels le rôle des frontières et des rapports entre contenant et contenu peuvent être déterminants. En effet l'optimisation de ces processus en même temps que la meilleure finesse de leur contrôle nécessitent l'extension maximale des zones d'échange et une ramification très poussée des systèmes arborescents censés pouvoir irriguer ou explorer tout un volume. Néanmoins ces exigences de

prolifération doivent se concilier d'une part avec la limitation de l'encombrement stérique (faute de quoi la taille de l'organisme le rendrait non viable) et d'autre part avec l'homogénéité individuelle de l'organe considéré. Seule une structure présentant des propriétés fractales permet de rendre compatible ces tendances *a priori* divergentes. Tous ces éléments d'analyse nous ont conduit à formuler l'ensemble d'hypothèses selon lesquelles :

(i) les fonctions biologiques vitales sont assurées par des structures pourvues de géométries fractales (au moins chez les espèces dont la taille moyenne dépasse un certain seuil ; voir la discussion pour le système respiratoire des insectes [Bailly, Gaill, Mosseri (1990)] ;

(ii) réciproquement la présence de caractères fractals dans une structure biologique est l'indice de l'existence d'une fonction vitale remplie par celle-ci ;

(iii) ces structures constituent la marque et le moyen du changement de niveau d'organisation : intégration des parties concernées dans une totalité de niveau supérieur, régulation entre niveaux.

Ainsi, pour résumer, la hiérarchisation et la transition entre niveaux biologiques d'organisation et de fonctionnement nous paraissent-elles indissociables de propriétés fractales des parties composantes engagées dans la caractérisation de ces niveaux et les processus de leur intégration.

On peut citer quelques exemples particulièrement illustratifs : en relation avec la fonction de respiration, on aura la membrane alvéolaire du poumon des mammifères ainsi que les arborescences bronchiques, ou, en rapport avec la digestion, les villosités intestinales, ou encore les systèmes arborescents artériels et veineux qui assurent la circulation, sans oublier le système nerveux, le cortex cérébral, etc.

## 3. Dynamiques embryogénétiques et attracteurs fractals

Le développement de telles structures au cours de l'embryogenèse peut être représenté par un modèle dynamique simple pour autant qu'on ne caractérise l'embryogenèse elle-même que comme le résultat (structurel) de divisions cellulaires et le produit (fonctionnel) de la différenciation (ou de la détermination, nous ne faisons pas de distinction à ce stade) entre lignées cellulaires. Bien entendu il ne s'agit là que d'une grossière approximation de la nature et de la réalisation du programme génétique encodé au niveau biomoléculaire, approximation qui laisse de côté la distribution topologique des cellules, leur migration au cours de l'embryogenèse, les productions protéiniques dont elles sont le siège, etc. Si nous acceptons néanmoins de nous limiter à un tel cadre étroit, les questions principales sont, d'une part, de parvenir à articuler la

prolifération cellulaire (qui donne naissance aux structures biologiques) avec la différenciation entre lignées cellulaires (associée à la restriction des potentialités propres à chaque lignée différenciée à partir de l'œuf fécondé totipotent) et, d'autre part, de réunir les conditions qui autorisent l'existence d'un fonctionnement réel qui allie l'aspect discret associé aux réalités structurelles et l'aspect plus continu, au moins à l'échelle du changement de niveau, que l'on peut associer à l'activité fonctionnelle. Pour y parvenir nous avons proposé [Bailly, Gaill, Mosseri (1989*b* et 1990)] un modèle de dynamique non linéaire que nous avons appliqué au cas de l'embryogenèse de *Caenorhabditis elegans* (un ver nématode dont les biologistes ont pu détailler complètement le développement embryonnaire, quantitativement comme qualitativement, à l'état sauvage comme en présence de mutations provoquées [voir Ehrenstein, Schierenberg (1980)] et dont nous allons examiner rapidement les caractéristiques puis les conséquences théoriques.

Commençons par énoncer les principes fondamentaux qu'une telle dynamique doit à notre avis respecter. Cette dynamique devrait être :

- (i) un endomorphisme,
- (ii) discret,
- (iii) récursif,
- (iv) non linéaire.

Chacune de ces spécifications formelles renvoie à un aspect biologique bien défini ; en résumé :

(i) L'endomorphisme correspond à l'autonomie d'une individuation dont les règles de développement sont internes et données une fois pour toutes (patrimoine génétique) et à la clôture organisationnelle corrélative [au sens de l'autopoïèse, Varela (1989)].

(ii) Le caractère discret correspond au mode de développement biologique (alternance de phases d'activité et de latence, périodes critiques, ponctuations séquentielles du développement [cf. aussi Changeux (1983); Wolpert, Lewis (1975)].

(iii) La récursivité correspond à un principe d'économie informationnelle par l'application d'une seule et même loi formelle réitérée à chaque étape du développement. Cette simplicité est parfaitement compatible avec une très grande richesse combinatoire et morphologique et son unicité intrinsèque s'accorde à la représentation d'une individualité déterminée et intégrée.

(iv) La non linéarité correspond au processus de complexification croissante associée à l'itération, à l'image de la complexification morphogénétique (une itération linéaire serait purement additive et inapte à rendre compte d'une complexification progressive, structurelle et fonctionnelle).

Par ailleurs il semble judicieux de choisir une non linéarité quadratique. Simple, elle répond au principe d'économie, voire de rudimentarité, que nous

cherchons à respecter dans une modélisation de principe. En même temps elle correspond bien à la représentation de processus interactifs multiplicatifs binaires (combinatoire génétique par exemple) ou de l'effet combiné de tendances plus ou moins antagoniques tels qu'ils apparaissent dans nombre de processus biologiques [May (1976 et 1987)] (dynamique des populations prédateurs/proies par exemple).

Le recours à la dynamique logistique discrète ( $D: x_{n+1} = ax_n(1-x_n)$ ) répond à ces conditions. Ses propriétés sont bien connues [Collet, Eckmann (1983); Bergé, Pomeau, Vidal (1984); Schuster (1988)], et nous avons montré qu'elles permettaient de rendre compte, dans le cas de *Caenorhabditis elegans* [Bailly, Gaill, Mosseri (1989*b* et 1990)], à la fois — par sa zone de doublement de période — des processus de mitoses et de multiplication cellulaire pour les structures et — par sa zone de sous segmentations chaotiques — des processus de différenciation entre lignées cellulaires.

Nous ne reviendrons pas sur ces discussions mais nous voulons souligner un point essentiel qui concerne la zone de transition entre le domaine périodique et le domaine majoritairement chaotique. Cette zone correspond, du point de vue de la modélisation, à l'articulation entre structure et fonction, c'est-à-dire à l'établissement du fonctionnement proprement dit ; elle se trouve caractérisée par l'existence, dans la dynamique, d'un attracteur étrange de dimension fractale sur l'intervalle ( $f \neq 0,538$ ). Nous constatons que cette fractalité se présente encore (mais relativement à la temporalité cette fois, par contraste avec la spatialité des structures fractales discutées auparavant) comme l'indice (dans l'espace abstrait de la « trajectoire » du développement) et le moyen de l'articulation et de la transition entre pôles qualitativement différents : celui de la structure et celui de la fonction dans ce cas.

Remarquons en outre qu'elle représente (dans le modèle, mais aussi dans la réalité) la transition entre le caractère discret des propriétés structurelles (populations cellulaires en cours de doublements réitérés) et le caractère continu, au moins à cette échelle, des fonctions associées aux spécialisations successives des lignées cellulaires (séparations entre sous segments continus explorés chaotiquement). On peut d'ailleurs s'attendre, d'une façon plus générale, à voir intervenir de telles structures fractales partout où se pose de façon déterminante la question de la compatibilité des propriétés respectives au cours de la transition entre discret et continu.

## Conclusion

Nous pensons avoir esquissé au travers de ces résultats et de ces discussions les raisons pour lesquelles la hiérarchisation entre niveaux d'organisation

biologique (au sens où nous avons défini de tels niveaux) et les conditions de passage d'un niveau à un autre font intervenir de manière privilégiée des structures pourvues de géométries fractales. Que ces aspects se manifestent dans l'espace réel (où ce sont les objets biologiques concernés qui présentent eux-mêmes ces caractéristiques en relation avec les fonctions vitales qu'ils remplissent) ou qu'on les décèle plus abstraitement dans l'espace de la dynamique qui les engendre (où ce sont les attracteurs qui, relativement au temps cette fois, présentent ces caractères). Bien entendu nous ne pensons pas avoir épuisé avec ces considérations la question très compliquée de la définition et de la hiérarchisation de ces niveaux, mais il nous semble qu'en tout état de cause la pertinence de la problématique de la fractalité ne peut manquer de s'y retrouver.

#### Références

- H. ATLAN, *A tort et à raison*, Seuil, 1987.  
 F. BAILLY, F. GAILL et R. MOSSERI, *Rev. Int. Syst.* 2, 1988, p. 295.  
 F. BAILLY, *Actes du Congrès européen de Systémique*, Lausanne 1989, A.F.C.E.T., 1989.  
 F. BAILLY, F. GAILL et R. MOSSERI, *Biologie Théorique*, Solignac 1987, C.N.R.S. éd., 1989 a.  
 F. BAILLY, F. GAILL et R. MOSSERI, *Actes du Congrès européen de Systémique*, Lausanne 1989, A.F.C.E.T. 1989 b.  
 F. BAILLY, F. GAILL et R. MOSSERI, *Biotheoretica*, 1990 (à paraître).  
 P. BERGE, Y. POMEAU et Ch. VIDAL, *L'ordre dans le chaos*, Hermann, 1984.  
 J.-P. CHANGEUX, *L'homme neuronal*, Fayard, 1983.  
 P. COLLET et J. ECKMANN, *Iterated maps on the interval as dynamical systems*, Birkhäuser, 1980.  
 G. von EHRENSTEIN et E. SCHIERENBERG, in *Nematodes and biological models*, 1, Acad. Press, 1980.  
 B. MANDELROT, *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman, 1982.  
 R. MAY, *Nature*, 261, 1976, p. 459.  
 R. MAY, *Proc. Royal Soc. Lond.*, A 413, 1987, p. 27.  
 H. G. SCHUSTER, *Deterministic chaos*, V.C.H., 1988.  
 H. E. STANLEY, *Introduction to phase transition and critical phenomena*, Clarendon Press, 1971.  
 A. TARDIEU et F. GAILL, *Actes du Congrès européen de Systémique*, Lausanne, 1989, A.F.C.E.T., 1989.  
 F. VARELA, *Autonomie et connaissance*, Seuil, 1989.  
 L. WOLPERT et J. LEWIS, *Fed. Proc.*, 34, 1975, p. 14.

## COORDINATION ET AMÉLIORATION : LES DEUX FACTEURS D'UN MONDE MEILLEUR

J. EUGÈNE

École des Hautes Études  
 en Sciences Sociales

#### Résumé

Le Club de Rome, en 1968, a lancé une étude pour saisir l'état du monde et donner à l'O.N.U. les moyens d'intervenir efficacement dans l'amélioration de la situation mondiale. La méthode préconisée a été mise au point par l'équipe de Mesarovic sous le nom de *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples*. L'application a été limitée à la saisie des données de l'époque. Nous avons proposé une relance de cette étude sous l'angle de la coordination et des améliorations.

#### Abstract

In 1968, the « Club de Rome » has started a study to perceive how was and how could be the world and to give to the U.N.O. the means to intervene for its amelioration. The method advocated was built by the equip of Mesarovic and was called *Theory of hierarchical multilevel systems*. But its application was limited to the collecting of datas. We propose a follow-up of the kind of work under the sign of coordination and amelioration.

Lorsque, en 1968, le Club de Rome commença ses discussions, les membres, présents à cette époque, furent avant tout sensibles à l'absence de toute recherche fondamentale sur l'interaction entre les grands problèmes qui assaillent la société humaine, et au fait qu'il n'en est pratiquement pas tenu compte, chaque fois qu'il s'agit de définir une politique et de la mettre en œuvre dans ces domaines.

Dans son effort pour démêler ce puzzle sans précédent qu'il appelle « problématique mondiale », le Club de Rome a, dans un premier temps, patronné un modèle de simulation mondiale qui utilisait la technique de la