

**Revue Internationale de**

ISSN 0980-1472

**systemique**

NUMÉRO SPÉCIAL  
« BIOLOGIE ET SYSTÉMIQUE »

Vol. 2, N° **4**, 1988

**afcet**

**Dunod**

**AFSCET**

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

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

volume 02, numéro 4, pages 443 - 457, 1988

Biologie et pratique systémique

Jean-Claude Tabary

Numérisation Afscet, janvier 2016.



Creative Commons

R. VALLEE, Sur la modélisation de la perception. In : *Actes du Ve Séminaire de l'Ecole de Biologie Théorique*, éd. H.B. Lück, Editions du CNRS, Paris, 277-288 (1987).

## BIOLOGIE ET PRATIQUE SYSTEMIQUE

Jean-Claude TABARY

Université Paris V<sup>1</sup>

### Résumé

L'étude du développement embryologique a été marquée par trois siècles de conflits entre conceptions contradictoires, les unes privilégiant la reconnaissance de structures sans se soucier d'expliquer leur genèse, les autres des genèses sans structures créatrices. Les difficultés qui marquent aujourd'hui l'approche des systèmes complexes relèvent certainement pour une part de mêmes attitudes exclusives. Les solutions apportées récemment aux problèmes posés par l'embryologie doivent aider à formuler des règles de pensée dans l'approche de tout système complexe.

### Abstract

Research in Embriology was characterized during three hundred years by conflicts of opinion between the supporters of exclusive preformation and those of exclusive epigenesis. Actually, this conflict is the illustration of the difficulties met to day in the analysis of any complex systems. So the answers given to problems in embriology can help to formulate theoretical principles in the approach of complex systems.

La systémique regroupe les démarches relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste. Mais l'exploration tactique de l'influence d'une variable au sein d'un système, complexe ou non, exige que cette variable soit modifiée effectivement dans une ambiance qui pour le reste, demeure

1. 12, rue de l'Ecole de Médecine, 75006 Paris.

stable. Cela suppose que la totalité des autres données soient maintenues constantes et donc prises en compte. Si tel n'était pas le cas, les modifications observées dans le système ne pourraient être valablement liées aux perturbations provoquées. De même, un mécanisme ne peut être isolé au sein d'un système qu'en fonction de l'ensemble des mécanismes agissants.

Dans un système complexe, il est impossible par définition de fixer la valeur de toutes les variables et de définir les mécanismes en jeu. Il devient alors indispensable d'accorder au moins provisoirement à l'aide d'hypothèses, implicitement ou explicitement, une valeur aux variables qui échappent à une détermination par voie concrète. Il est de même indispensable de postuler l'existence de mécanismes complémentaires de celui que l'on souhaite étudier. Toute réflexion sur un processus expérimental, même le plus restreint, fait apparaître aisément l'importance des hypothèses provisoires. La façon la plus spontanée d'établir de telles hypothèses consiste à admettre l'existence d'entités inaccessibles à l'observation directe et à doter ces entités de propriétés antérieurement définies dans des systèmes plus simples et mieux connus. C'est ainsi que de tous temps, la connaissance a pu progresser.

Les entités postulées ont résulté durant des millénaires d'une projection antropomorphique aboutissant à la création des structures irréductibles par un demiurge. «Si les triangles faisaient un Dieu ils lui donneraient trois côtés (Montesquieu)». Le demiurge était généralement doté d'une volonté propre mais il pouvait créer des signes permettant d'analyser cette volonté. Le XVII<sup>e</sup> siècle a marqué le refus de l'appel au demiurge dans l'explication de l'inconnu mais le processus d'utilisation d'un connu pour expliquer un inconnu a persisté car il est inévitable. C'est un principe, une loi établie dans un contexte réduit d'expérience qui se voient attribués une validité universelle a priori.

Deux principes sont toujours très communément admis et jouent un rôle essentiel dans l'étude des systèmes complexes. Le premier est celui d'un déterminisme absolu qui marque pleinement tous les faits observables, avec une priorité accordée aux influences externes pour expliquer le comportement des organismes. Ce sont seulement les insuffisances de l'esprit humain qui font apparaître incertitudes et indéterminations. Le second principe est celui de l'intervention du hasard organisateur, prêtant à des fluctuations désordonnées et imprévisibles, des capacités d'organisation. Ce hasard étant plutôt localisé dans l'environnement, le rôle des influences externes se trouve encore renforcé.

Ce cadre conceptuel a permis le développement considérable des connaissances qui a marqué les périodes récentes. Cela peut-être pour

des raisons très indirectes en ayant favorisé les approches quantitatives numérisées qui permettent seules de tirer des conclusions valides devant des données qualitatives contradictoires ou agissant en sens opposé. Aujourd'hui, les limites de la méthode commencent cependant à être perçues. Est souvent reconnue une extension trop universelle des lois physiques de contraintes externes à des domaines où ces lois ne s'appliquent pas. Cela souligne l'intérêt du modèle réellement révolutionnaire introduit par Claude Bernard en biologie, celui d'une finalité «particulière», «cherchée au sein d'un organisme étudié et non en dehors de lui». «Le tube digestif de l'herbivore est fait pour digérer des principes alimentaires qui se rencontrent dans les plantes, mais les plantes ne sont pas faites pour lui». Il semble bien que Claude Bernard ait vu dans cette distinction une approche d'efficacité plus qu'un principe ontologique puisqu'il écrit aussi : «La conception de finalité particulière est peut-être un adjuvant pour l'esprit, pour l'intelligence».

Quoiqu'il en soit, le point de vue de Claude Bernard marque le retour de la finalité, tout en maintenant une condamnation de causes finales ou premières qui sont renvoyées à la métaphysique. Il y a une condamnation de facto du déterminisme absolu dont l'application systématique reviendrait à une cause première. Le même point de vue a conduit à une homéostasie implicite, celle d'une constance du milieu interne en dépit des fluctuations externes. L'homéostasie est devenue explicite dans l'interprétation des idées de Claude Bernard par Cannon, initiant une théorie de l'autonomie chez Vendryes, puis chez Maturana et Varela. Ce sont les mêmes soucis dans l'analyse biologique qui avaient conduit un peu plus tôt Jean Piaget à la reconnaissance des fonctions propres de l'organisme «sujet» pour expliquer tout développement.

La biologie est donc au centre de l'émergence d'un principe nouveau dans l'approche des systèmes complexes et tout naturellement, la biologie apparaît comme un champ d'études unique pour le développement du concept de finalité particulière et des généralisations qui peuvent être tirées. «La force vitale dirige des phénomènes qu'elle ne produit pas, les agents physiques produisent des phénomènes qu'ils ne dirigent pas (Claude Bernard)». Même si la formulation ne correspond pas aux conceptions actuelles du fonctionnement vital, le principe de l'auto-contrôle des organismes, inexplicable directement par les lois physiques, est posé.

\*\*\*\*\*

Les tentatives d'explication en Biologie ont débuté au 17<sup>e</sup> siècle.

L'un des premiers problèmes discutés a été celui de comprendre le comportement animal en termes comparables avec ceux d'une approche physique triomphante. Cela a donné lieu au concept des animaux machines de Descartes qui éliminait toute idée de finalité particulière propre à un organisme.

Toutes aussi fondamentales ont été les interrogations posées par l'étude des développements, développement individuel de l'embryologie, développement collectif dans l'évolution des espèces. Par la suite, de nouveaux problèmes sont apparus, générés par les progrès parallèles de la physique et de la biologie. S'est posée la question d'expliquer la permanence et la survie des organismes en dépit des agressions, ce qui paraissait contraire au deuxième principe de la thermodynamique. Par ailleurs, les biologistes ont cherché à combler le fossé dessiné par la réalité physico-chimique du vivant et l'incapacité de tout expliquer par cette réalité.

Cependant, l'essentiel des découvertes biologiques s'est fait dans un cadre de recherches parcellisées, permettant de définir des principes locaux conditionnels grâce à la méthode expérimentale. Cela au point que de nombreux biologistes refusent toujours aujourd'hui les approches globalistes ou théoriques. Tôt ou tard, il apparaît pourtant nécessaire de relier entre eux, des principes locaux et l'approche globale redevient indispensable. Nombre de progrès biologiques récents sont liés à des approches d'ensemble associant un réductionnisme expérimental et une réflexion théorique globalisante. L'exemple de l'immunologie est particulièrement instructif sur ce point. Il est cependant intéressant dans la perspective de cet article de revenir sur les problèmes tels qu'ils se sont posés historiquement car la façon dont les problèmes ont été résolus, a valeur d'exemple. L'évolution des idées en Embryologie est alors tout spécialement instructive.

\*\*\*\*\*

C'est la découverte des spermatozoïdes au microscope par Leuwenhoek en 1677 qui marque les débuts de l'Embryologie théorique. Elle conduit Hartsoeker quelques années plus tard, à la première tentative d'explication méritant le terme de scientifique : le spermatozoïde est la pré-forme de l'individu tel qu'il se présente à la naissance. Il y a acceptation implicite d'une structure formelle sans souci d'explication de sa genèse, le pourquoi et comment du développement sont négligés. C'est le type même des explications structuralistes modernes, telles qu'on les rencontrent dans la Gestaltpsychologie ou le Structuralisme

linguistique de Jacobson et de Lévy Strauss. Il s'agit d'explications pré-causales et non causales comme le fait remarquer Piaget car elles n'apportent en fait aucune explication de mécanisme, et refoulent simplement d'un niveau, l'analyse.

En 1759, Wolff attaque le préformisme en déclarant qu'il ne trouve aucune forme pré-existante dans l'œuf d'oiseau et il formule la théorie de l'épigénèse : il y a formation secondaire et progressive des organes. Selon cette thèse, le développement prime la structure mais l'explication est tout aussi pré-causable car elle néglige totalement le fait qu'une stricte prédiction de la forme de l'individu achevé est possible. C'est le type même des conceptions empiristes modernes qui postulent une genèse sans se soucier de décrire des conditions qui la rendent possible.

Le conflit entre les deux conceptions persiste près de deux siècles, entretenu par des positions plus politiques que scientifiques. Les aspects idéologiques, vitalisme et rationalisme religieux derrière le préformisme, matérialisme derrière l'empirisme entretiennent l'opposition. Aucun tertium n'est perçu, les faiblesses de chacune des thèses constitue l'essentiel de la défense de la thèse adverse.

En 1891, Driesch montre que la séparation des deux cellules formant l'embryon d'oursin au stade initial de son développement conduit à la formation ultérieure de deux oursins complets. Le fait condamne un préformisme simpliste et ouvre à l'idée de régulation. En 1951, Watson et Crick découvrent la structure en double hélice des acides desoxyribonucléiques (A.D.N.) qui constituent le matériel de l'hérédité. La pré-existence de l'A.D.N. à tout développement, sa complète stabilité ultérieure conduisent à une résurgence tout aussi pré-causale du préformisme. Cependant, l'alternance rapide des points de vue a favorisé l'évolution actuelle des idées, marquée par l'abandon de l'opposition des thèses, qui fait place à des aspects conjoints de préformisme et d'épigénèse. Un modèle réellement causal apparaît et de profondes révolutions conceptuelles se dessinent.

### Les aspects de préformation

Dès les débuts de l'œuf, des structures «préformées» sont présentes, qui résument tous les éléments organisateurs expliquant le développement de l'œuf et le fonctionnement de l'individu achevé faisant suite. Ces structures sont doubles :

a) elles comprennent une «forme» ou plutôt un référentiel, pré-existant dans un système antérieur qui l'a généré et transmis, immuable

durant la vie, à la pathologie près, et qui représente le patrimoine héréditaire. Mais ce référentiel n'a pas de valeur de forme géométrique stable, au sens gestaltiste. Le référentiel n'est pas un « raccourci de l'individu phénotypique futur » même s'il y a d'emblée un « sujet » présent. Le référentiel doit plutôt être considéré comme un ensemble d'opérateurs capables de contrôler la génération de formes qui n'existent pas encore, même à l'état de plans ou de schémas concrets.

Le préformisme traditionnel avait fait la même erreur que celle que l'on rencontre dans la plupart des structuralismes et qui consiste à rechercher les germes créateurs dans les éléments discernables d'un système achevé. Ainsi le structuralisme linguistique fait abusivement appel à l'opposition du « cru et du cuit » pour générer la notion d'antagonisme, à la pratique de la troisième personne des pronoms personnels pour générer la notion d'autrui. Au contraire, l'étude du patrimoine héréditaire révèle une différence profonde de nature entre le gène, unité fonctionnelle de ce patrimoine, et le phénotype, unité descriptive de l'individu achevé. Le gène est en fait un mélange d'algorithmes constructeurs et de paramètres qui modulent le déroulement des algorithmes. Le gène est un catalyseur, a-t-on pu dire, et un catalyseur qui doit être incorporé dans un système agissant, un catalyseur dont l'action dépend des substances chimiques qu'il rencontre.

b) on comprend alors que l'œuf doive comporter, outre le référentiel, une machinerie complète qui assure la lecture des algorithmes et qui préexiste à tout développement.

L'ensemble structural de l'œuf ne constitue donc pas un germe pur mais définit un « sujet autonome » complet, maître de son développement ultérieur si des conditions favorables minimales sont rencontrées.

### Les aspects d'épigénèse

L'existence d'une épigénèse est tout aussi reconnue puisque la cellule initiale ne contient même pas une préforme des organes futurs, à plus forte raison une forme perceptible de l'individu final. Cette forme n'apparaît que secondairement. Il n'existe pas davantage de plan pré-établi servant de référence ou d'orientation pour les transformations successives.

Il est manifeste que la faiblesse des théories traditionnelles d'épigénèse résidait dans le même défaut qui marque les théories empiristes en tous domaines, celui de chercher en dehors de l'organisme les influences et les instructions assurant la formation de l'individu achevé.

En fait, il apparaît bien aujourd'hui que l'œuf est le propre maître de son développement. Cette réalité, évidente pour tous en ce qui concerne l'œuf d'invertébré, de poisson ou d'oiseau, est tout aussi manifeste pour le spécialiste dans le développement embryologique du mammifère.

En l'absence de plan pré-établi, le développement est assuré par les transformations induites dans l'œuf par son propre vécu. Si les algorithmes de construction demeurent stables, les paramètres qui règlent ces algorithmes évoluent du fait même du fonctionnement et cette évolution provoque les changements fonctionnels qui assurent le développement. C'est donc une sorte de réflexion de sa propre activité sur lui-même qui est responsable du développement de l'œuf. L'exercice d'une étape de développement modifie simultanément les paramètres caractérisant le milieu interne de l'œuf et transforme l'environnement des algorithmes, provoquant un nouveau mode de fonctionnement et par là, une nouvelle étape. Tout se suit à la façon « d'un enchaînement de théorèmes géométriques où chacun est rendu nécessaire par l'ensemble des précédents sans être contenu d'avance dans les axiomes de départ (Waddington) ». C'est la constance des conditions initiales et de l'environnement qui fait de cette suite de transformations, une ligne de développement contraignante et prédictible.

En définitive, on voit rejeter les thèses comme celles du préformisme traditionnel qui postulent des structures sans se soucier d'expliquer valablement leur genèse, et les thèses inverses de l'épigénèse traditionnelle qui invoquent une genèse sans se préoccuper de décrire les mécanismes qu'exige cette genèse. L'explication la plus valable reconstruit dans l'œuf, un sujet pré-existant dont le mode de formation est défini. Ce sujet est porteur d'une information constructrice mais d'une information définie en terme d'opérateurs fonctionnels et non de pré-structure. Il y a là une leçon manifestement généralisable pour toute étude de système complexe.

### La nature de l'information référentielle

Ce qui permet de dépasser l'opposition ancienne entre préformisme et épigénèse est donc lié à la nature de l'information contenue dans le programme préformé qui sert de référence. Cette information n'est pas descriptive mais fonctionnelle. Elle associe des algorithmes et des constantes paramétriques qui définissent les conditions initiales. L'information n'a pas de valeur en elle-même mais seulement pour une machinerie pré-existante à laquelle elle est adressée et qu'elle module. Cette réinterprétation du sens de l'information est certainement de

portée générale. Elle reviendrait en quelque sorte à redéfinir ce qui est important dans le discours. Celui-ci ne doit pas être pris pour une collection de sujets et de compléments reliés accessoirement par des verbes mais bien comme des verbes dont l'action est spécifiée par les sujets et les compléments qui y sont adjoints et qui ont valeur de paramètres.

Tout ceci s'intègre fort bien dans la théorie ternaire formulée par Demand et Pinson. Le message héréditaire de l'A.D.N. est formé d'un long squelette linéaire, de maillons d'acide phosphorique et d'un sucre, le désoxyribose. Chaque sucre est porteur d'une base dont la variété qui est de quatre, peut être symbolisée par les lettres A, C, G ou T ; il existe donc en quelque sorte un alphabet à quatre lettres. Chaque lettre est une information de deux bits mais elle n'a isolément pratiquement aucun sens. Le sens apparaît dans un groupement de trois lettres, par exemple A-T-A. Ce mot est caractéristique de l'un des vingt acides aminés qui entrent dans la formation des protéines, substance noble de la matière vivante. La succession des mots dessine donc un enchaînement d'acides aminés, caractéristique d'une protéine particulière. On trouve donc bien comme le veut la théorie :

- une valeur propre pour chacune des lettres considérées isolément
- un contexte explicite qui signifie chaque lettre en fonction de son emplacement dans la chaîne d'un mot, chaque mot en fonction de son emplacement dans la chaîne d'un gène
- un contexte implicite, le sens de la chaîne d'A.D.N. étant purement relatif à une machinerie cellulaire existante.

Par ailleurs, l'information contenue dans l'œuf y est présente deux fois et sous la double forme décrite par Pinson et Demailly :

- une forme vécue, liée, qui est celle d'une cellule observable dont un biologiste peut décrire les caractères. Cette information est seulement potentielle et doit être extraite par l'observateur. Elle est distribuée, infractionnable, analogique. Cependant, une constitution holographique, sans repères spatio-temporels constants, la répétition de nombreux éléments identiques permettent un fractionnement avec répartition équilibrée des constituants sans perte d'information. La duplication d'une cellule est alors aisée et donne naissance à un organisme d'emblée achevé. Les gamètes dont la fusion marque la naissance de l'œuf, sont proches des cellules mères qui leur ont donné naissance, l'individu achevé n'est pas fondamentalement différent du germe. Ce fractionnement de duplication est la réponse fondamentale à l'énigme que posait l'apparition d'un nouvel organisme doté d'emblée de ses propriétés structurales et fonctionnelles.

- mais l'information est doublée sous une forme concrète, typographique, transmissible, au travers de la chaîne d'A.D.N. Cette information est linéaire et au sein d'un organisme possédant les mécanismes appropriés, elle peut reconstituer l'information liée. Elle est de l'information à l'état « pur », sans fonction par elle-même mais immédiatement disponible pour « instruire » un organisme pré-existant. Dans sa nature, cette information est digitalisée, fractionnable en unités informatives isolables. L'avantage de cette typographie est de constituer un référentiel stable, résumant toutes les instructions nécessaires pour assurer les transformations d'une cellule donnée pré-existante, dans un sens défini.

Cette adéquation de l'information contenue dans l'œuf avec les schémas de Demant, Pinson et Demailly n'est pas arbitraire mais concrètement réalisée, ce qui valorise considérablement ces schémas.

### Structuration et développement

L'information transmise représentée par la chaîne d'A.D.N. se réduisant à un ensemble d'algorithmes et à des définitions de paramètres, se pose le problème du passage de ces données à la transformation de l'œuf pour en faire un individu achevé. Il est possible de décrire trois niveaux dans la traduction de l'information.

Le premier niveau est marqué par la formation de chaînes linéaires d'acides aminés. La succession des lettres correspondant aux bases de l'A.D.N. dessine des séquences que la machinerie existante transforme en séquences définies d'acides aminés. Le processus est tout à fait déterminé mais n'a pratiquement aucune chance de se produire spontanément si tous les éléments nécessaires à son élaboration ne sont pas présents. La liaison entre deux acides aminés est fortement endothermique, exige la présence d'énergie libre et d'un certain nombre de catalyseurs ou enzymes ; la liaison est donc fortement négentropique par elle-même. Au contraire, la liaison devient nécessaire, déterminée dans le milieu de l'œuf, en présence de dérivés d'A.D.N., d'enzymes et d'énergie libérée par des réactions exothermiques couplées. La liaison correspond alors à un accroissement global d'entropie.

La chaîne d'acides aminés une fois construite, c'est une conformation tridimensionnelle particulière qui assure sa fonction et en fait véritablement une protéine active. Aucune information complémentaire n'est nécessaire pour cela car cette conformation se réalise spontanément dans le milieu cellulaire. Elle est en effet la forme d'équilibre de la chaîne d'acides aminés qui est soumise à de nombreuses forces in-

trinsèques, marquées par des attirances ou des répulsions entre mailons. L'information déterminant la séquence d'acides aminés est donc non seulement fondamentale mais également suffisante.

Dès lors qu'il y a un apport énergétique continu venu de l'extérieur de la cellule et que la synthèse des protéines est également continue, on est en présence d'une structure dissipative typique dont il est important de décrire les particularités informatiques. La structuration n'est par elle-même aucunement créatrice d'information. Toute l'information est contenue dans les conditions initiales et il y a en quelque sorte seulement un changement d'état nécessaire, qui s'accompagne d'un accroissement d'entropie.

En revanche, la protéine formée a des propriétés structurales ou fonctionnelles qui traduisent un gain d'information liée pour l'ensemble cellulaire. Mais s'agit-il d'une véritable création ou d'une simple restitution ? Pour répondre à cette question, il faut bien entendu considérer l'origine de l'information transmise contenue dans la chaîne A.D.N. Il y a toute chance pour que cette information transmise soit une transcription cristallisée ou typographiée d'une information liée pré-existante, elle-même traduisant justement dans un organisme cellulaire antérieur, l'existence des protéines nées de la structuration. Ainsi, le bilan informatique de la structuration dissipative apparaît tout simplement nul, et c'est là une conclusion qui mériterait une généralisation.

Le deuxième niveau de développement de l'œuf est marqué par l'insertion d'un corps protéinique nouvellement formé au sein de la cellule. Cette insertion est rendue très facile par la structuration holographique de la cellule.

— la cellule est réductible à un ensemble d'éléments figurés qui constituent des systèmes isolables, conservant leur autonomie au sein de la cellule. Le nombre d'éléments d'une variété définie n'est habituellement pas critique, ce qui permet un renouvellement continu sans altération structurale. On se trouve en présence d'une population hétérogène qui perdure alors même que les individus qui la composent, meurent et sont remplacés par d'autres individus identiques nouvellement formés.

— on pourrait alors se demander comment une simple réunion d'éléments disparates peut suffire à définir un système global dont les fonctions sont originales, très complexes par rapport à la somme des fonctions élémentaires présentées par les constituants figurés. La réponse est trouvée dans une théorie générale de la structure complexe qui doit concilier le réductionnisme et le structuralisme.

Alors même que la structure d'un élément est stable, il présente

très habituellement des changements d'état qui modifient ses relations avec son entourage. Certains de ces changements peuvent traduire des fluctuations purement locales, sans significations comportementales. D'autres, plus durables, peuvent être qualifiés d'états stationnaires. «Ils ressemblent à des équilibres du fait de leur invariance dans le temps, mais en diffèrent en ce sens que des flux continuent à se produire dans le système et qu'en conséquence, de l'entropie est produite. (Katchalsky et Curran)». A ces états stationnaires correspondent des fonctions particulières comparables par exemple au changement de régime de moteur qui accompagne le changement de vitesse d'une automobile. Or les constituants sont très fortement couplés entre eux, si bien que les états stationnaires qui les caractérisent sont interdéterminés.

Cette interdétermination dessine selon l'expression de Jean Piaget une structuration des actions en «groupes», au sens mathématiques, définissant des opérations dont le résultat va au delà de la somme des actions isolées. La distribution des actions est «associative». A chaque action est associée une action inverse, antagoniste, ce qui permet une équilibration des actions. L'élément neutre propre au groupe, est traduit par l'invariance temporelle des états stationnaires.

a) on observe des synergies associatives. Le produit de l'action d'un enzyme constitue le substrat d'un autre enzyme, le tout formant des chaînes de réaction complexes qui s'établissent spontanément. Ainsi les voies successives d'Embden-Meyerhof et de Krebs qui assurent l'apport énergétique fondamental par dégradation du glucose comportent une trentaine d'étapes qui se succèdent spontanément. L'absence d'un seul enzyme de la chaîne a des conséquences dramatiques.

b) on observe des synergies antagonistes et régulatrices. Outre un site récepteur pour le substrat, un enzyme comporte des sites récepteurs de régulation. Un corps chimique venant se fixer sur un site de régulation provoque une action de facilitation ou au contraire d'inhibition. Or ces corps chimiques actifs sont très habituellement les produits d'autres enzymes. L'ensemble réalise donc un «groupe» de feed-backs fonctionnels au sens que Pierre de Latil donne à ce mot : des circuits à rétroaction dont la boucle de retour est ouverte à des influences extérieures qui font varier le niveau d'équilibre fonctionnel.

Ainsi se dessine un réseau d'actions, riche et défini, très précis alors même que la structuration anatomique est très floue. Ce réseau conserve ses fonctions alors même que certains exemplaires des constituants disparaissent et sont remplacés par de nouvelles synthèses. Le renouvellement continu des protéines à partir de l'information transmise par l'A.D.N. permet une survie cellulaire dans son état de référence

durant des dizaines d'années alors même que l'espoir de vie d'un enzyme constitutif ne dépasse pas quelques semaines.

Le système global est très efficace vis-à-vis des déformations de tous types. Les déviations anormales de développement notamment sont aisément corrigées car elles se traduisent par un déséquilibre fonctionnel qui provoque immédiatement un effet régulateur.

Le troisième niveau marque le passage de l'organisation cellulaire à l'organisation multicellulaire de l'individu achevé. Ce niveau est beaucoup plus simple qu'il ne paraît à première vue, car l'individu achevé est moins différent de l'œuf initial qu'on ne serait tenté de le penser.

a) une cinquantaine de divisions cellulaires successives exponentielles suffit à produire les quelques cent mille milliards de cellules qui forment l'individu dans sa permanence et son renouvellement.

b) il suffit de modifications relativement ponctuelles pour faire apparaître les différenciations cellulaires caractérisant l'individu achevé. Quelques modifications de surface règlent l'adhérence d'une cellule avec ses voisines, expliquant la liberté du globule blanc dans le milieu sanguin ou la continuité de l'épiderme.

Par ailleurs, comme l'avait pressenti Geoffroy Saint Hilaire, la différenciation cellulaire se réduit à la prééminence de l'une des fonctions présentes initialement dans la cellule. Le programme potentiel de tous les types de cellules est présent dans la chaîne A.D.N. La lecture de cette chaîne étant sensible aux paramètres de l'environnement, l'expression de chaque fonction se trouve modulé par ces paramètres. Le simple processus de la multiplication cellulaire induit les changements paramétriques nécessaires à la différenciation cellulaire. Cette différenciation est du reste tellement réduite chez la plupart des végétaux que les cellules de l'organisme achevé conservent la capacité de donner naissance à un individu complet lorsque les conditions de milieu sont favorables. En revanche, chez l'animal, la différenciation paraît irréversible dès que la partition de l'œuf a fourni 16 ou 32 cellules.

### Développement et environnement

L'œuf ne constitue nullement un système fermé. Il existe en permanence des flux d'échanges avec l'environnement. En revanche, ces flux sont pleinement contrôlés :

- une membrane sélective protège contre la pénétration de toutes formes de bruit.
- le développement ne peut s'effectuer correctement que dans

une ambiance dont de nombreux paramètres comme la constitution gazeuse, le degré hygrométrique, la température sont définis et maintenus constants. Dans l'œuf d'oiseau, les réserves énergétiques et les constituants sont présents au début du développement ; les déchets sont accumulés localement. Dans le développement placentaire, énergie et constituants sont constamment renouvelés et les déchets constamment évacués, par une circulation sanguine qui relie l'embryon à l'organisme maternel. Mais le flux des échanges avec l'environnement maternel est tout aussi déterminé et encore plus exigeant dans la fixation des paramètres d'environnement. En quelque sorte, les conditions d'environnement sont également un référentiel.

Ainsi se trouvent réunies les conditions d'une succession d'événements qui n'est ni chaotique, ni périodique et pourtant globalement prédictible à partir de l'ensemble des paramètres définissant la situation initiale. C'est la constance des paramètres externes qui assure l'originalité du développement embryologique. Il faut insister sur ce point pour prendre pleinement conscience de la valeur exemplaire de ce développement. En effet, l'éclosion de l'œuf ou la naissance visible de l'embryon placentaire ne marquent pas un changement fondamental du point de vue de la dynamique interne de l'organisme. La modification fondamentale est la sortie d'un environnement marqué par des paramètres particulièrement constants et définis. Après la naissance, ces paramètres sont beaucoup plus variables. L'organisme continuera son développement en s'efforçant d'analyser les régularités paramétriques de son environnement et en cherchant à s'y adapter de façon optimale. Du point de vue d'une théorie systémique, le changement n'est pas essentiel.

\*\*\*\*\*

La longue gestation qui a précédé l'apparition d'une conception embryologique satisfaisante est exemplaire à double titre. Tout d'abord se trouvent exposées de façon diachronique, l'ensemble des difficultés que l'on rencontre au cours d'une tentative d'explication de tout système complexe. Par ailleurs, l'histoire de l'embryologie souligne bien le danger qu'il y a, à développer exagérément un point de vue partiel, génétique ou structural notamment. Il est donc légitime de tirer les leçons de l'histoire de l'embryologie pour formuler des règles de conduite dans l'approche des systèmes complexes.

### Le principe d'autonomie

Du moment qu'un système complexe survit en conservant au moins certaines invariances dans son comportement, on est en droit de le considérer a priori comme un système autonome. Il faut notamment refuser de voir dans un tel système, le simple lieu géométrique d'influences externes auxquelles il serait attribué des propriétés organisatrices. Il n'y a aucune raison de refuser les lois physiques universelles dans l'étude du système mais il faut comprendre qu'elles agissent avant tout de l'intérieur du système. Par ailleurs, nos connaissances de ces lois sont trop incomplètes pour que nous puissions en déduire totalement le comportement d'un système. Celui-ci doit donc être considéré au moins en partie comme original et étudié en tant que tel.

### La priorité de l'analyse fonctionnelle

Il est plus important de préciser le comportement d'un système que d'en décrire l'anatomie. L'analyse structurelle entraîne de nombreuses erreurs. D'une part, nombre de structures sont davantage des constructions de l'esprit que des réalités concrètes. D'autre part, il est pratiquement inutile d'isoler une structure si son comportement n'est pas connu avec précision. Enfin, la finalité d'une structure est liée à sa fonction.

Cette importance reconnue de la fonction conduit à considérer simultanément la structure dans son invariance et les différents états variables dans lesquels se trouvent la structure. Une attention toute particulière doit être accordée aux états stationnaires de non équilibre qui sont la clef de la dynamique interne d'un système. Ces états sont suffisamment permanents dans le temps pour permettre leur description et par ailleurs, ils déterminent la plasticité contrôlée du système qui explique son comportement et ses capacités adaptatives.

### Le réductionnisme holographique

Il est pratiquement indispensable, pour décrire correctement un système, d'en préciser des éléments constituants. Cela est certainement moins dangereux que de doter a priori une structure irréductible de propriétés imaginaires. Les méfaits du réductionnisme ne sont pas liés à son principe mais à un mésusage. Sur le plan des structures, le fractionnement en parties est tout à fait légitime et d'un point de vue anatomique, chaque partie peut être décrite isolément. En revanche, en

terme de comportement, les changements d'état de chaque partie sont dépendants des états du système dans son entier et de l'état de chacune des autres parties. Cette vision renouvelée du réductionnisme qui considère simultanément la partition structurelle et l'holographie fonctionnelle est peut-être la leçon la plus essentielle de la biologie contemporaine.

### L'équilibre entre l'étude des genèses et des structures

La connaissance ne peut être qu'approximative et tout point de vue cognitif comporte une part d'erreur. Toute utilisation systématique d'un point de vue cognitif conduit à des conséquences ultimes, présente donc une évolution chaotique, source d'absurdités. Le seul moyen d'éviter cette évolution est une préférence pour le développement simultané de points de vue différents. L'histoire de l'embryologie souligne qu'un raisonnement basé sur des structures dont la genèse n'est pas expliquée conduit à l'erreur comme y conduit un appel à des genèses dont les mécanismes formateurs ne sont pas précisés. En revanche, l'étude simultanée des structures et des genèses est positive. La précision de leur genèse est bien souvent le meilleur moyen d'approfondir la nature d'une structure. De même, c'est le refus d'accepter une genèse sans explication qui révèle l'existence de structures créatrices.

En définitive, quel pourrait-être le sens d'un accord entre la biologie et une théorie générale des systèmes ? Cet accord est-il arbitraire ou nécessaire ? En fait, peu importe. L'essentiel est que la théorie des systèmes peut beaucoup profiter des analyses biologiques et qu'inversement, la biologie peut beaucoup gagner à pratiquer une formulation systémique.