

LA PLURIDISCIPLINARITÉ DANS LES SCIENCES DE LA VIE : UN NOUVEL OBSTACLE ÉPISTÉMOLOGIQUE, LA NON-LINÉARITÉ

Janine Guespin-Michel
Camille Ripoll

La pluridisciplinarité est d'autant plus nécessaire et d'autant plus difficile à réaliser que l'on est plus "bas" dans l'échelle comtienne des sciences. Mais un nouvel obstacle est apparu il y a quelques années et persiste en biologie, au niveau même de l'utilisation de théories physiques ou de formalismes mathématiques qui pouvaient le plus contribuer à faire avancer les questionnements et les connaissances. Il s'agit de théories (ou de formalismes) non linéaires destinées à traiter de la complexité du vivant. Les difficultés rencontrées par l'introduction de ces conceptions nouvelles chez les chercheurs en biologie sont plus d'origine philosophique que d'origine scientifique, et se présentent comme un obstacle épistémologique lié notamment à la notion de déterminisme.

Il y a un paradoxe croissant entre l'appel constant à la pluridisciplinarité dans les sciences de la vie, qui en fait presque une "tarte à la crème" de la prospective scientifique, et la difficulté évidente à la faire progresser sur le terrain.

Les raisons en sont multiples, certaines sont bien connues, comme les répercussions toujours actuelles de la classification comtienne des sciences qui font notamment que les étudiants en biologie sont sélectionnés par l'échec en mathématiques, tandis que les étudiants des sciences plus "dures" ne reçoivent pas d'enseignement de biologie. D'autres sont à notre avis beaucoup moins souvent évoquées. Parmi elles, une terrible pomme de discorde, qui surgit dès que l'aspect temporel des phénomènes biologiques étudiés devient central, que nous désignerons par le qualificatif mathématique de *non-linéarité*. "Placage totalitaire" pour les uns, preuve de l'incapacité de la science et de la mort du déterminisme pour les autres, l'utilisation d'un formalisme utilisant des équations différentielles non linéaires est diabolisée ou portée aux nues d'une manière qui ressort bien plus d'un débat idéologique que scientifique. Pourtant il s'agit d'une avancée majeure des sciences mathématiques et physiques du xx^e siècle, dont les possibles applications en biologie ne peuvent pas être ignorées.

Il y a une
difficulté
évidente à faire
progresser la
pluridisciplinarité
dans les sciences
de la vie

1. PLURIDISCIPLINARITÉ ET SCIENCES DE LA VIE : ÉTAT DES LIEUX

1.1. Le rôle de la théorie dans les sciences

Lorsqu'on évoque les obstacles à l'étude pluridisciplinaire du vivant, on pense souvent à la différence des contenus des enseignements reçus par ceux qui devraient être les partenaires de telles études. L'une de ces différences est souvent sous-estimée : il s'agit du rôle et de la place de la théorie dans les différentes disciplines scientifiques et dans la recherche qui s'y effectue.

en physique,
il existe un vaste
cadre théorique
explicite

En physique, par exemple, il existe un vaste cadre théorique explicite (mécanique quantique, théorie des champs, etc.) dans lequel s'insère la pratique expérimentale de cette discipline. Dans ce cadre théorique, des modèles matériels ou de pensée permettent de formuler des hypothèses et d'en déduire des conséquences que l'on peut soumettre à l'épreuve de l'expérimentation. Presque universellement les attributs de ces modèles sont des observables quantitatifs. Une telle structure se prête bien au formalisme mathématique, et de fait, en physique, les théories sont exprimées sous une forme mathématique.

la biologie
avance sans
cadre théorique
explicite

La biologie avance sans cadre théorique explicite. La diversité et l'étendue des problèmes posés dans le champ de la discipline, leur extrême complexité conduisent souvent à favoriser des raisonnements scientifiques inductifs moins adaptés à une formalisation mathématique. L'exemple y a vertu de témoin du général. L'expérimentation y est conçue d'une façon que beaucoup de biologistes estiment "naturelle" et qui, pensent-ils, ne nécessite pas de formulation explicite préalable d'une "théorie mathématisée" (assimilant au passage théorie et mathématiques). De fait il n'y a en biologie que très peu de théories explicites et la plus prestigieuse d'entre elles, la théorie de l'évolution, est peu utilisée sauf dans le cercle restreint des biologistes de l'évolution, ou n'est utilisée que pour expliquer *a posteriori* les découvertes. Il y a encore moins de théorie exprimée mathématiquement en biologie. Le formalisme mathématique n'est généralement utilisé que pour des modèles valides localement ou de façon métaphorique, comme le souligne Henri Atlan (1979) : *"Il arrive que le langage mathématique soit utilisé par les biologistes de façon incorrecte et que pourtant 'ça marche'. C'est parce qu'il s'agit le plus souvent de métaphores et que cette utilisation correspond à des besoins – ou à des blocages – proprement biologiques, c'est-à-dire à des questions posées par le développement de la biologie elle-même. Quand on s'aperçoit que la métaphore est fautive on est, bien sûr, gêné, même si elle marche un temps ; parce qu'on voit qu'elle devient, dans la mesure où on y croit trop, un obstacle à des développements futurs. Alors on essaie de la démasquer et d'analyser*

les rôles
différents que
jouent les
théories selon
les disciplines
scientifiques sont
une difficulté
majeure de la
pluridisciplinarité
appliquée
à la biologie

les glissements de sens qui accompagnent son utilisation. Cela peut avoir pour résultat, entre autres, de retourner aux méthodes mathématiques et de poser de nouvelles questions à propos de ce qui fut métaphorisé, de telle sorte à essayer de justifier, a posteriori, les glissements initialement involontaires de la métaphore.

Il en est ainsi en ce qui concerne certains formalismes issus des mathématiques, qu'on a tenté d'utiliser pour mieux cerner les problèmes que pose la logique de l'organisation biologique."

un enseignement d'épistémologie serait particulièrement utile dans cette discipline

Un enseignement d'épistémologie serait particulièrement utile dans cette discipline. En effet, la théorie n'est évidemment pas absente chez les biologistes puisque aucune connaissance scientifique n'est possible hors d'un cadre théorique. Mais ce cadre théorique est souvent implicite et l'on peut même avancer que la conception de la quasi totalité de l'expérimentation repose sur tout un ensemble d'hypothèses implicites. L'absence d'enseignement d'épistémologie dans les cursus universitaires n'aide pas à percevoir cet état des choses. Quoi qu'il en soit, c'est peut-être au niveau du rôle de la théorie dans une discipline autant ou plus qu'au niveau du contenu même de cette discipline que se situent les plus grandes difficultés à la mise en œuvre d'une réelle pluridisciplinarité(1).

1.2. Réductionnisme et globalisme en biologie

• Opposition globalisme/réductionnisme en biologie

Réfléchir à la pluridisciplinarité implique aussi de prendre en compte que la biologie n'est pas une discipline homogène. Les différentes sous-disciplines qui la constituent se répartissent entre deux pôles qui en définissent à la fois la méthodologie et les "attitudes" (Jacob, 1979).

la démarche réductionniste fondée sur une méthodologie analytique voit son apogée avec la biologie moléculaire

Le pôle réductionniste rassemble les sous-disciplines qui s'efforcent d'analyser les êtres vivants en en recherchant les parties de plus en plus petites, considérées comme de plus en plus fondamentales. La démarche réductionniste, qui est fondée sur une méthodologie analytique, voit son apogée actuellement avec la biologie moléculaire. Ce pôle est effectivement très pluridisciplinaire comme le souligne par exemple Antoine Danchin (1980a) : *"Les progrès les plus spectaculaires de la biologie ont pris naissance au moment où l'on a pu reconnaître qu'il était possible d'analyser les êtres vivants*

(1) Nous sommes conscients du caractère succinct de notre argumentation concernant un sujet dont l'importance justifierait en fait un article à soi seul. Il nous paraissait cependant indispensable d'évoquer cet état de choses, dans la mesure où il s'agit d'une difficulté qui peut se manifester y compris au niveau de la lecture de cet article.

en n'invokant pas d'autres principes que ceux de la physique et de la chimie. Cela a permis, d'abord, de décrire l'organisation hiérarchique du vivant grâce à la mise en évidence de niveaux d'intégration successifs délimités par la dimension des objets, ou par des frontières." Nous verrons cependant que cette pluridisciplinarité a des limites et que les principes de la physique et de la chimie auxquels elle fait appel excluent ou ignorent les apports de la dynamique des systèmes non linéaires.

le pôle globaliste étudie le vivant à ses niveaux d'organisation supérieurs

Le pôle globaliste étudie le monde vivant à ses niveaux d'organisation supérieurs, organisme, écosystème, populations, dans une optique synchronique ou évolutive. Ce champ d'étude a ses méthodologies propres qui font de plus en plus appel à des méthodes statistiques et de modélisation mathématique sophistiquées. Mais les méthodologies recouvrent aussi des différences d'attitudes épistémologiques et philosophiques très importantes qui accentuent les écarts entre les tenants des deux pôles et transforment en conflit ce qui pourrait apparaître comme une complémentarité.

l'opposition réductionnisme / globalisme tend à recouvrir l'ancienne opposition mécanisme / vitalisme

Chaque pôle cristallise toute une série de positions contraires. L'opposition réductionnisme/globalisme entraîne dans son sillage respectivement les oppositions contenu/forme, local/global, fini/indéfini, discontinu/continu, instant/durée, hasard/nécessité, stochastique/déterministe, simple/ complexe (Guespin-Michel, 1998). Cette opposition tend aussi à recouvrir l'ancienne opposition mécanisme/vitalisme qui reprend de l'importance avec les positions plus ou moins ouvertement créationnistes qui fleurissent actuellement. Ces positions s'autorisent justement d'une utilisation, dont nous essaierons de montrer qu'elle est abusive, d'une certaine pluridisciplinarité. Le mot holisme utilisé souvent pour globalisme est défini par Ilya Prigogine et Isabelle Stengers (1997), comme synonyme de vitalisme : *"Le réductionnisme d'aujourd'hui est le mécanisme d'autrefois ; de même, le holisme recouvre à peu près l'ancien vitalisme. Ce rajeunissement du vocabulaire devrait au moins contribuer à écarter les confusions. Mieux vaut éviter tout rapprochement entre le mécanisme, au sens d'explication exclusive de la finalité, et la mécanique rationnelle. L'antiréductionnisme n'implique pas nécessairement l'admission de forces vitales. D'ailleurs, l'expression s'entend en au moins deux sens. Il peut s'agir soit de 'qualités occultes' (comprenons : d'entités verbales), soit de forces qui ne se manifestent que dans les organismes."*

C'est aussi l'opinion d'A. Danchin, qui présente ainsi les positions globalistes qu'il caractérise comme "antiréductionnistes" (1980b) : *"Les propriétés intrinsèques du vivant sont considérées comme irréductibles à l'analyse, seule la considération du Tout peut être explicative et il ne sert à rien de disséquer et de chercher à comprendre combien les divers éléments se composent, c'est le Tout qui impose sa matrice*

fonctionnelle aux éléments du système vivant, et qui seul permet de les comprendre... Il existe de nombreuses variétés de cette façon de voir, toujours à la mode, et il serait facile de proposer une collection de textes allant de Lamarck à Thom, de Lyssenko à Koestler, ou de Prigogine à la Nouvelle Droite, où est affirmée la toute-puissance du global et où l'attitude analytique est ridiculisée de diverses manières (la plus fréquente utilisant le terme de réductionnisme), associée à diverses connotations plus ou moins injurieuses."

pourquoi en biologie une opposition aussi acharnée entre réductionnisme et globalisme ?

Non explicitées, ces oppositions rendent souvent le débat impossible, et les conséquences financières en terme de partage des crédits de recherche contribuent à les transformer en luttes d'influence. Pourquoi, en biologie, la complémentarité entre réductionnisme et globalisme a-t-elle tourné à un véritable combat entre des écoles se réclamant de l'un ou l'autre des deux pôles ? Pourquoi une telle attitude conflictuelle n'existe-t-elle pas ou est-elle moindre dans d'autres disciplines, au moins à leur stade actuel de développement ? Approches réductionnistes et globalistes existent pourtant dans les sciences physiques. La mécanique, fût-elle relativiste, décrit le mouvement de la matière à l'échelle macroscopique, voire cosmologique, sans faire nécessairement appel aux propriétés des atomes qui la constituent. Les propriétés chimiques macroscopiques de cette matière ne sont par contre aisément comprises qu'en faisant appel à la structure atomique et moléculaire de celle-ci. Cependant dans la physique contemporaine le passage entre les niveaux de description macro- et microscopique est assez bien compris. Par exemple la thermodynamique statistique permet de fonder dans les propriétés moléculaires de la matière la signification des variables d'état macroscopiques comme la pression ou la température ou même celles de fonctions d'état thermodynamiques plus abstraites comme l'entropie ou l'énergie interne. La nécessité des niveaux de description est admise sans difficulté ; il ne viendrait pas à l'idée de la majorité des physiciens de considérer comme "faible" une explication du fonctionnement d'un amplificateur à partir de la théorie des circuits bien que celle-ci néglige toute référence à la structure moléculaire de chacun des transistors qui le constitue.

contrairement à ce qui se passe dans les sciences physiques

• Une tentative de dépassement de cette opposition

En biologie le passage d'un niveau de description à un autre demeure un grand défi théorique. C'est peut-être parce qu'on comprend mal comment s'articulent les niveaux hiérarchiques du vivant que les tenants les plus "durs" des attitudes réductionnistes ou globalistes en sont venus à nier la nécessité même de comprendre cette articulation. Les réductionnistes considèrent que les propriétés d'un niveau sont "comprises" dès lors que le sont celles du niveau inférieur, attitude que l'on résume souvent dans la formule classique

à cet antagonisme s'oppose une démarche...

... qui cherche à comprendre les rapports entre les différents niveaux d'intégration du vivant...

... et qui constitue la biologie intégrative

qui fâche tout rouge les globalistes : "le tout résulte de la somme des parties". Au contraire les globalistes purs considèrent qu'il ne sert à rien de rechercher dans les propriétés d'un niveau inférieur celles du niveau supérieur, attitude que l'on résume dans la formule qui cette fois fâche tout rouge les réductionnistes intransigeants : "le tout est plus que la somme de ses parties". Au-delà des formules dont on peut en effet discuter le caractère abrupt ("tout" et "parties" s'appliquant selon le cas à des objets ou aux propriétés interactives de ces objets) la difficulté de construire des théories permettant de comprendre la hiérarchisation des niveaux du vivant a conduit à une sorte de stratification des attitudes épistémologiques en biologie. Attitudes qui fondamentalement trouvent la source de leur exclusion mutuelle dans des positions philosophiques irréductibles et qui entraînent une certaine résistance à accepter de les dépasser.

Il a pourtant été montré sur quelques exemples, qu'il existe en fait une démarche visant la synthèse et le dépassement de cette opposition réductionnisme/globalisme en en transformant les deux termes en composantes complémentaires de la réalité. Cette démarche génère des attitudes dialectiques vis-à-vis de positions philosophiques apparemment irréductibles : *"À l'heure actuelle, deux types de démarches s'apparentent à cette tentative. Celles qui cherchent à partir du niveau inférieur à comprendre le niveau supérieur en recherchant les propriétés d'émergence. Et celles qui partent des propriétés globales du niveau supérieur et qui cherchent à les préciser grâce aux connaissances sur les éléments du niveau inférieur."* (Guespin-Michel, 1998, 1980). Ces démarches, complémentaires constituent ensemble une nouvelle discipline des sciences du vivant, la biologie intégrative (Ripoll et coll., 1998). C'est, à notre avis, cette voie du dépassement qu'offrent les théories de la "non-linéarité" comme nous tentons de l'expliquer ci-après. C'est aussi pour cela que, projetée au premier plan d'un débat idéologique extrêmement fort, cette "non-linéarité" fait l'objet tout autant de rejets dogmatiques que d'incantations anti-scientifiques.

Il ne s'agit pas d'un faux débat. La vérité finit certes toujours par triompher, mais si le scientifique anglais Mitchell n'avait pas eu de fortune personnelle pour publier à compte d'auteur ses résultats sur la force chimiosmotique (cf. Guespin-Michel, 1998), combien de temps aurait-il fallu attendre pour que cette découverte émerge ? Inversement, il ne serait pas raisonnable de contribuer à financer des pseudo-recherches pour la plus grande gloire des positions anti-scientifiques, et il est normal que la communauté scientifique reste vigilante. Vigilante, mais pas retranchée dans des positions *a priori*, vigilante, mais ouverte au débat, et suffisamment tolérante vis-à-vis de ce qui est nouveau dans les autres sciences pour en oser l'utilisation, pour rechercher, comme le demande H. Atlan (1999) de *"nouveaux paradigmes en biologie"*.

2. LA NON-LINÉARITÉ : DES MATHÉMATIQUES UTILES À LA BIOLOGIE

2.1. Définition et propriétés des équations différentielles linéaires et non linéaires

la dynamique peut être considérée comme une transdiscipline qui décrit l'évolution des systèmes dans le temps

Tout dans l'univers est en mouvement ; le changement, l'évolution semblent être des caractéristiques fondamentales de l'état actuel du monde connaissable. La *dynamique* peut être considérée comme une transdiscipline dont l'objet est de décrire l'évolution des systèmes dans le temps. On peut ainsi parler de la dynamique des astres, de la dynamique des réactions chimiques, de celle des échanges thermiques entre les océans et l'atmosphère terrestre, etc. La vie est éminemment un phénomène dynamique. Les mathématiques offrent au "dynamicien" toute une panoplie de modèles et de langages permettant de formaliser l'évolution des processus. Considérons le plus important d'entre eux, le système d'équations différentielles. Il s'écrit simplement $dx/dt = f(x,t;\mu)$, où dx/dt représente l'ensemble des dérivées temporelles des variables du système (mathématiquement c'est une matrice colonne) et $f(x,t;\mu)$ l'ensemble des fonctions (autre matrice colonne) décrivant les causes des changements qui vont se produire dans le système ; t est évidemment le temps et μ l'ensemble des paramètres du système (constantes de vitesses de réactions chimiques, taux de mortalité et de fécondité des différentes espèces d'une niche écologique, etc.).

les mathématiques offrent toute une panoplie de modèles et de langages

Pour beaucoup de systèmes importants $f(x,t;\mu)$ se réduit à $f(x;\mu)$, on parle alors de systèmes "autonomes". Dans la plupart des cas réels, $f(x;\mu)$ est une fonction non linéaire des variables x . Ce qui signifie que la cause du changement généré par une somme de variables n'est pas égale à la somme des causes relatives à chaque variable isolée : $f(x+y;\mu) \neq f(x;\mu) + f(y;\mu)$. Les systèmes chimiques et enzymatiques, dans lesquels les x sont les concentrations de différentes espèces, sont des exemples familiers de systèmes non linéaires.

Quel est le problème posé par les équations non linéaires ? C'est tout simplement que dans la quasi totalité des cas on ne peut pas, après s'être donné une condition initiale ($x = x_0$ connue pour un temps t_0 choisi comme origine), écrire explicitement la solution du système d'équations différentielles. Constatation fâcheuse qui peut être surmontée de deux façons très différentes. La première est de n'envisager que de petites variations de x autour d'une valeur de référence, particulière ; alors $f(x;\mu)$ peut être remplacé par une approximation linéaire. Par exemple, si l'on "reste le nez collé" sur une boule et que l'on ne s'autorise que de petits déplacements autour d'un point à la surface de cette boule, alors cette surface nous apparaîtra localement plate (la Terre fût long-temps plate). La deuxième façon de surmonter les difficultés

l'utilisation des ordinateurs a permis d'explorer les trajectoires des équations représentant des dynamiques non linéaires

quelles sont
les différences
entre équations
linéaires et
non linéaires ?

de résolution des systèmes non linéaires, c'est l'analyse numérique et la simulation sur ordinateur, qui ont enfin permis d'explorer les propriétés de ces équations.

Quelles sont les différences entre équations linéaires et non linéaires ? On démontre en mathématiques que les systèmes linéaires admettent une solution unique, $x_s(t)$, explicite dès lors que l'on se donne une condition initiale (voir plus haut). Ainsi le comportement futur du système est entièrement prédictible à partir de la connaissance de son état présent, il est déterminé par la nature, linéaire, des fonctions f . De plus pour des contraintes données, les variables x_s finissent par acquérir des valeurs qui ne changent plus au cours du temps, des valeurs stationnaires. Bien sûr si on modifie les contraintes ou encore un ou plusieurs paramètres μ du système, les variables vont à nouveau évoluer et finir par prendre de nouvelles valeurs stationnaires. Au fond ceci revient à modifier les conditions initiales et à suivre la marche du système vers un nouvel état stationnaire. Avec les systèmes linéaires tout se passe de façon continue et parfaitement prédictible. Si on change peu les contraintes ou un paramètre ou les conditions initiales, le nouvel état stationnaire ne changera lui aussi que peu par rapport à l'ancien.

• Des "bifurcations"

on a découvert
les propriétés
nouvelles
des systèmes
non linéaires
comme
l'existence de
bifurcations...

Avec les systèmes non linéaires, ou plus exactement avec certains d'entre eux, si on modifie un paramètre pertinent au-delà d'une valeur critique, il peut se produire un changement qualitatif du comportement dynamique. Par exemple, en continuant de faire varier le paramètre au-delà de sa valeur critique il se peut qu'il existe non pas une, mais deux façons nouvelles de faire varier les états stationnaires, deux routes en quelque sorte. Un tel phénomène s'appelle une bifurcation. Dans les processus réels le choix aléatoire de l'une de ces routes fait intervenir ce que les physiciens appellent des fluctuations dont l'ensemble forme une sorte de bruit permanent d'origine microscopique (par exemple lié au mouvement des molécules) superposé à l'état moyen du système observable dans la quasi-totalité de nos expériences. L'une de ces routes peut aussi conduire à des oscillations entretenues tant que seront maintenues les contraintes. De plus il peut exister de multiples points de bifurcation, parfaitement déterminés par la nature des équations non linéaires $f(x;\mu)$. Il est facile de comprendre qu'étant donné le caractère aléatoire, probabiliste, du franchissement d'une bifurcation, l'état actuel du système dépendra de son histoire évolutive antérieure. C'est ce que Prigogine appelle "*l'entrée de l'histoire dans les systèmes dynamiques*" (Prigogine et Stengers, 1979.). Cette imprédictibilité de connexion entre les différents régimes d'un système dynamique déterministe non linéaire est l'un des points de fixation du débat épistémologique autour de la non-linéarité, nous y revenons plus bas.

• **Une sensibilité extrême aux conditions initiales (le chaos déterministe)**

... la sensibilité
aux conditions
initiales...

Ce débat est encore alimenté par une propriété connue sous le nom métaphorique "d'effet papillon". Certains processus non linéaires sont en effet très sensibles aux conditions initiales ; il suffit de changer très peu ces dernières pour déclencher un changement considérable dans le comportement dynamique du système, ceci se poursuivant longtemps après ce changement déclencheur. D'où le nom d'effet papillon : "quand un papillon bat de l'aile au Japon, il peut créer une tempête à Paris". Si on observe le comportement du système au cours du temps, il semble sans ordre, chaotique. On a donné le nom de chaos déterministe à cette propriété, et le choix du mot "chaos" est sans doute responsable de beaucoup de malentendus.

• **L'émergence de structures spatio-temporelles**

... l'auto-
organisation
de structures
spatio-
temporelles

Pour terminer ce survol des propriétés de la non-linéarité, il faut évoquer la relation temps-espace dans les systèmes dynamiques non linéaires. En effet dans la construction de modèles destinés à représenter un phénomène réel, hydrodynamique, biochimique, etc. les variables x n'ont généralement pas la même valeur en tout point du système et elles y changent au cours du temps. Mathématiquement le modèle précédent devient un modèle d'équations aux dérivées partielles qu'il est inutile d'explicitier ici (voir par exemple Nicolis et Prigogine, 1977). Les systèmes linéaires ont cette fois encore un comportement simple. Il suffit de se donner les conditions initiales (aspect temporel) et les conditions aux limites (aspect spatial) pour établir la solution unique du problème. Que peut-il se passer de nouveau avec les systèmes non linéaires ? Par exemple, à partir d'une certaine taille critique un système homogène devient instable, et il peut apparaître un nouvel état stable qui, lui, n'est pas homogène dans l'espace. Il émerge du milieu uniforme une structure spatiale. C'est un autre exemple de bifurcation connu sous le nom de bifurcation de Turing (c'est par exemple la vitesse différente de diffusion de certaines molécules qui tend à créer des rétroactions déstabilisantes sur le système). Dans d'autres cas, les structures spatio-temporelles peuvent prendre la forme d'ondes de formes très diverses. Ces structures qui n'apparaissent que loin de l'équilibre (au voisinage de l'équilibre les systèmes sont linéaires) ont été appelées structures dissipatives (Glansdorff et Prigogine, 1970). L'une de leurs propriétés, majeure, est d'établir une cohérence macroscopique dans le fonctionnement du processus dynamique. Cette structure est autant le produit de l'activité du système que la cause de cette activité. Sans son activité le système en tant que structure n'existe pas, et réciproquement. Cette propriété, qui conduit, dans certains cas bien entendu, à réviser la causalité linéaire de structure vers fonction, n'a strictement rien de mystérieux mais est pourtant déran-

geante. Elle l'est d'autant plus que la source de l'émergence de l'ordre est également bien connue : c'est le désordre. Ceci a été appelé "*l'ordre par fluctuations*" (Glansdorff et Prigogine, 1970) ou sous une autre forme, en se référant à la théorie de l'information, "*l'ordre à partir du bruit*" (Atlan 1979).

L'ensemble de ces propriétés d'organisation des systèmes dynamiques non linéaires, pour lesquelles, on l'a vu, les conditions externes "coopèrent" avec les propriétés internes pour faire émerger des structures spatio-temporelles, est rassemblé dans le concept d'auto-organisation.

2.2. Utilisation de la non-linéarité en sciences expérimentales

En quoi les modèles mathématiques non linéaires, et leur cortège de propriétés nouvelles concernent-ils les sciences expérimentales et la biologie en particulier?

en physique
et en chimie,
une littérature
très abondante
décrit les
phénomènes
non linéaires

Il existe une littérature très abondante en physique et en chimie qui décrit des phénomènes non linéaires sources de structures dissipatives spatio-temporelles ou de chaos. En mécanique des fluides, par exemple, les instabilités de Bénard et de Taylor (formation dans un liquide, loin de l'équilibre thermique, de petites cellules convectives occupant toute l'étendue du fluide) sont des exemples bien connus de ces structures. En chimie la réaction de Bélousov-Zhabotinski est l'archétype de réaction chimique oscillante ou générant des structures spatiales dissipatives de type ondes ou spirales (Vidal et Lemarchand, 1988). On connaît aujourd'hui des dizaines de réactions chimiques oscillantes. Elles ont souvent des mécanismes très complexes mais certaines d'entre elles ont pu être modélisées par des systèmes d'équations différentielles non linéaires.

les systèmes
composant
le vivant sont
souvent régis
par des
dynamiques
non linéaires...

En biologie, pratiquement tous les niveaux d'organisation du vivant ont fait l'objet de modèles non linéaires. En biochimie, au niveau des réactions entre molécules, on peut citer l'exemple des oscillations de la glycolyse (Goldbeter, 1990) et en biologie cellulaire, celui de la signalisation intracellulaire par le calcium ou du cycle cellulaire (Goodwin, 1994). On a donné de l'organisation multicellulaire et de la genèse des formes (la morphogenèse) des modèles qui sont de véritables prototypes des approches non linéaires : l'agrégation des amibes acrasiales (Goldbeter, 1990) et la théorie des morphogènes, initialement proposée par Turing en 1952, qui permet par exemple de comprendre la genèse des motifs que l'on peut observer sur le pelage des animaux (Murray, 1988). C'est peut-être en écologie et en dynamique des populations que les modèles non linéaires ont été les plus utilisés. Le modèle historique de Lokta-Volterra (1926) décrivant les oscillations du nombre de proies et de leurs prédateurs dans un écosystème est un archétype en la matière. Il a aujourd'hui donné naissance à des modèles bien plus sophistiqués (le lecteur intéressé par les aspects techniques et mathématiques de ces

modèles peut se référer au livre de Murray, 1993). Des aspects très caractéristiques de la dynamique non linéaire se retrouvent dans des processus biologiques de grande importance. La multistationnarité (existence potentielle de plusieurs états stables pour un système dans des conditions données, mais dont un seul est réalisé, déterminé par l'histoire antérieure du système) est un concept très attractif pour expliquer, au niveau cellulaire, les phénomènes de différenciation ou d'épigenèse (Thomas, 1973). Du chaos déterministe a été découvert dans des processus physiologiques divers (ou dans leur altération pathologique) comme les battements cardiaques ou l'épilepsie.

D'autres auteurs ont cherché à établir une théorie plus globale de la complexité, faisant largement appel à la non-linéarité et reposant sur des modèles mathématiques divers. Ils ont proposé des théories sur l'origine de la vie, l'évolution, la différenciation (Kauffman, 1995 ; Atlan, 1979 ; Prigogine et Stengers, 1979). Ces théories ont en commun la prise en compte de la notion de complexité comme double métaphore, complexité/vivant et complexité/non-linéarité (Gell-Mann, 1994). Sur l'ensemble de ces sujets, voir le livre de Michel Laurent (1999) et pour une histoire de l'introduction de ces notions, Gleick (1987) et Ruelle (1991).

Cette énumération, non exhaustive loin s'en faut, d'utilisation de modèles non linéaires en biologie (parfois simplement de façon métaphorique d'ailleurs) pour rendre compte des propriétés essentielles du vivant (produit de l'auto-organisation, historicité, devenir, adaptation, etc.), peut laisser croire que les théories non linéaires occupent d'ores et déjà une place centrale en biologie. Il n'en est rien et nous pensons que l'intervention de facteurs idéologiques, questionnant la place du déterminisme dans les sciences, est une cause très importante de cet état de choses.

2.3. Non-linéarité et idéologie : le déterminisme en question

Le débat autour du déterminisme est extrêmement compliqué. S'y enchevêtrent de multiples pistes, s'y opposent des conceptions du monde contradictoires dont certaines ne sont pas explicitées, voire sont volontairement masquées et s'y utilisent, sous forme de métaphore ou non, des concepts mathématiques pas toujours maîtrisés par leurs utilisateurs (Sokal et Bricmont, 1997). Comme chaque fois qu'un débat scientifique masque et recouvre un débat idéologique, les polémiques sont extrêmement virulentes. Telles ont été, par exemple au XIX^e siècle, les polémiques qui ont marqué l'avènement de la théorie cellulaire, et dont Georges Canguilhem a si bien montré qu'elles recouvraient aussi un débat sur l'individualité qui séparait républicains et royalistes (Canguilhem, 1969). Ici, croyons-nous, le débat oppose scientifiques (matérialistes ou positivistes) et ceux que l'on

... pourtant
les formalismes
non linéaires
sont extrême-
ment peu
utilisés par
les biologistes

une des
difficultés
de l'utilisation
d'une
mathématique
non linéaire...

qualifie souvent de “créationnistes” même si, en France, ils se présentent rarement ainsi.

- Nous avons vu ci-dessus l'origine du problème dans l'imprédictibilité de certaines trajectoires pour des processus obéissant à des dynamiques non linéaires. Face à cela, plusieurs attitudes s'affrontent, et l'utilisation différente du vocabulaire masque ou accroît des divergences d'opinion. Pour certains, le terme “déterminisme” conserve le sens qu'il a chez Claude Bernard (Israël, 1992), et qui le rend synonyme de prédictibilité, il y a alors deux positions extrêmes en ce qui concerne l'utilisation du formalisme non linéaire dans les sciences.

- Les uns nient, au nom du déterminisme scientifique, la possibilité d'une trajectoire non prédictible lors d'une bifurcation. Les modèles que nous avons décrits ci-dessus sont admis comme un “jeu” mathématique mais en aucun cas ne sont considérés comme pertinents pour des processus réels. On déclare donc non scientifique, l'utilisation d'un formalisme non linéaire.

- À l'opposé, d'autres concluent de l'existence d'un tel formalisme, dont la pertinence physique n'est pas *a priori* écartée, que le déterminisme doit être rejeté (mort du déterminisme). Mais ce dernier “camp” n'est pas homogène et il faut encore y distinguer deux positions radicalement différentes (bien qu'elles soient souvent confondues).

- Pour l'une, le déterminisme strict correspond à une conception révolue de la science qu'il faut remplacer par une autre conception scientifique; cette position est défendue par Prigogine et Stengers (1997) par exemple : *“...ce fait culturel et historique qui confère à l'effort scientifique le sens d'une quête d'intelligibilité. La question est alors de savoir dans quelle mesure l'identification de cette intelligibilité au déterminisme définit une science historiquement datable, ou, comme le mathématicien René Thom le soutient, caractérise l'essence même de la science... Au déterminisme des évolutions vers l'équilibre ou vers un état stationnaire proche de l'équilibre se substitue, loin de l'équilibre, une problématique où les notions de stabilité et d'instabilité sont primordiales. C'est de la stabilité ou de l'instabilité du régime d'activité par rapport aux fluctuations que dépend la pertinence de la définition du système en termes de ses variables externes et internes. Aux points de bifurcation, cette définition ne permet pas de prévoir le comportement, mais seulement de comprendre les raisons pour lesquelles une fluctuation incontrôlable, loin de rester sans conséquence, pourra s'amplifier jusqu'à mener le système vers un nouveau type de régime d'activité qualitativement différent.”*

- Pour l'autre, le déterminisme reste associé à la science dont le formalisme non linéaire montrerait alors les limites. La science qui ne sait plus prédire est discréditée. C'est la “mort

... vient de ses répercussions sur la notion de déterminisme

de la science”, position irrationaliste relayée par le créationisme.

à des
dissensions
philosophiques
réelles,
s'ajoutent des
ambiguïtés liées
à des définitions
différentes du
déterminisme...

On voit combien différent fondamentalement ces deux positions par rapport au déterminisme. Bien que proclamant toutes deux les limites du déterminisme elles s'inscrivent, l'une dans une démarche de prise en compte des avancées scientifiques (ce qui ne veut pas dire, tant s'en faut, qu'elle soit adoptée sans interrogation par la majorité des scientifiques, y compris des physiciens), l'autre dans une perspective ouvertement anti-scientifique.

... notamment
la confusion
entre
déterminisme
et prédictibilité

- Au fond toutes ces oppositions ou parfois ces dérives ne sont-elles pas nourries par l'assimilation systématique du déterminisme à la prédictibilité? Tous les systèmes non linéaires dont nous avons discuté ici sont parfaitement déterminés dans ce sens que, dès lors que les conditions en sont réunies, une bifurcation ne peut que se produire. Elle est déterminée comme n'importe laquelle des trajectoires qui la précède ou la suit. Ce qui ne peut généralement pas être prédit, en revanche, c'est laquelle de ces trajectoires sera effectivement choisie (en science, prédire c'est spécifier de façon certaine la succession temporelle des états d'un système). Cette position n'est pas sensiblement différente, au vocabulaire près, de celle défendue par Prigogine. Et on peut résumer avec Dahan Dalmedico et coll. (1992) : *“il est des systèmes dynamiques qui, pour avoir des avenir parfaitement déterminés, n'en sont pas moins imprédictibles. En d'autres termes, il suffit d'une légère imprécision sur leur état pour que leur comportement échappe à la prédiction. C'est la désormais célèbre sensibilité aux conditions initiales... Est-ce que pour autant on ne peut rien dire? Ce livre montre comment, tant en mathématiques qu'en physique, de tels systèmes sont apparus, sur les pages ou les écrans d'ordinateurs des uns, dans les expériences des autres, et comment de nouveaux modes de description permettent de les appréhender.”*

2.4. Non-linéarité et idéologie : débats et polémiques

L'effort, fait au paragraphe précédent, d'analyse de la diversité des positions vis-à-vis de la non-linéarité et du déterminisme est, pensons-nous, utile même s'il est forcément réducteur (beaucoup de positions sont plus nuancées que ne le suggère notre classification un peu simpliste). Cependant le débat autour du déterminisme, qu'il reflète ou non de véritables divergences, n'est pas encore suffisant pour expliquer les polémiques violentes qui surgissent autour de la non-linéarité. Il faut comprendre quels autres présupposés idéologiques et philosophiques les alimentent.

Antoine Danchin, scientifique de renom qui a beaucoup œuvré à la mise en place d'une pluridisciplinarité en biologie

Antoine
Danchin
dans un article
de 1980...

(la génomique ou bio-informatique), a écrit en 1980 un article très polémique dans la revue *"Le Débat"* (Danchin, 1980b), où il attaque les travaux de plusieurs chercheurs utilisant des formalismes non linéaires ; l'article se termine ainsi : *"Il s'agit là de cas typiques de placages, de formalismes (parfois très élaborés) sur la réalité et utilisés comme justifications du principe du primat du global (qui n'est, évidemment, jamais remis en cause). Ce placage évite la confrontation contradictoire avec les faits, il évite aussi la contradiction logique (à coup sûr, un appareil mathématique aussi élaboré que celui de la topologie différentielle est logiquement cohérent) et fort de son succès interne (dû à sa cohérence logique), peut faire croire à son adéquation à la réalité."*

... soulève
une polémique
violente...

Les trois théories mises en cause, ou plutôt l'application de ces trois théories à la biologie qu'il conteste, sont la théorie des catastrophes (topologie mathématique) de René Thom (Thom, 1983), celle des structures dissipatives (physique et chimie) de Prigogine (Prigogine et Stengers, 1979) et celle de l'ordre par le bruit (théorie de l'information) illustrée en particulier par Atlan (1979). On peut alors se demander en quoi l'utilisation des lois de la physique et de la chimie qui a fait selon cet auteur la scientificité de la biologie (cf. citation ci-dessus, Danchin, 1980a), devient placage lorsqu'il s'agit des structures dissipatives par exemple et pourquoi le débat prend un tour aussi âpre et passionnel ? Ce qui ressort le plus de l'article de Danchin, c'est le refus de toutes les théories basées sur la non-linéarité, au nom du refus (que nous partageons) d'une attitude globaliste (ou holiste) confondue avec un vitalisme "moderne". C'est ce que révèle un autre passage du même article : *"Le principe sous-jacent à toutes ces attitudes, qu'on peut qualifier d'attitudes holistes, est l'introduction d'un principe d'émergence de l'être, qualité essentielle du monde dont on postule l'existence en dehors de la matière... À cet égard la thermodynamique est un outil de choix, puisqu'il est possible de faire sans cesse un va-et-vient confus entre le macroscopique et le microscopique, entre le déterministe et l'indéterministe, afin d'imposer n'importe quel point de vue. Le concept d'énergie peut alors servir à tout, et l'on parlera d'énergie psychique, par exemple ; de même, le concept d'entropie servira à véhiculer une idéologie de l'ordre..."*

On ne peut qu'être frappé par l'amalgame constant entre les niveaux scientifique et idéologique de cette polémique ; amalgame qui, de la part d'un auteur aussi rigoureux qu'Antoine Danchin, doit forcément attirer l'attention et suggérer que certains des tenants de ces positions en font un outil de guerre contre la rationalité et la science (cf. le n° 115 de *Raison présente*, consacré à ce problème). Cependant, il faut faire attention : une méthode doit-elle être rejetée parce qu'elle est susceptible d'être dévoyée ?

... qui montre un amalgame entre notions scientifiques et idéologiques

On peut aussi, puisque cet article date de 1980, reconnaître qu'en effet les théories critiquées par A. Danchin n'ont pas été extrêmement productrices en terme d'expérimentations et d'avancées concrètes des connaissances en biologie. Mais en ont-elles eu la possibilité ? Depuis 1980, et contrairement à ce que semble dire cette citation, ces théories ont été bannies de l'enseignement de la biologie, rares sont les biologistes qui en ont eu connaissance, plus rares encore ceux qui ont eu les moyens d'expérimenter en s'appuyant sur l'une ou l'autre d'entre elles. La suspicion dans laquelle est tenue toute mathématique tout court, et particulièrement toute mathématique non linéaire, est bien illustrée dans une anecdote racontée par René Thomas (communication personnelle). Il a cherché à publier un article contenant à la fois des résultats expérimentaux concernant la régulation d'un virus bactérien (qui, seuls, auraient été publiés dans un excellent journal de microbiologie fondamentale) et un modèle non linéaire basé sur les circuits logiques et les boucles de rétroaction positives, sur lequel étaient appuyées les expériences. L'article n'a pu être publié que dans une revue théorique.

3. PERSPECTIVES

le modèle de l'opéron a ouvert la voie à la biologie moléculaire, mais l'étude des conséquences des rétroactions reste à faire

Comment trouver une issue à ces difficultés ? En 1964, l'attribution du prix Nobel aux trois chercheurs français, André Lwoff, François Jacob et Jacques Monod consacrait la validité d'un modèle biologique, le modèle de l'opéron (Jacob et Monod, 1961) dans lequel des rétroactions (positives ou négatives) sont à la base de systèmes de régulation, c'est-à-dire d'un modèle montrant l'importance fondamentale de réactions de type non linéaire en biologie. Dans le même temps cet aspect des choses était totalement oblitéré par la méthode dite "physico-chimique" d'exploration de cette réalité, méthode qui allait devenir exclusive et, c'est indéniable, conduire aux résultats de toute première importance de la biologie moléculaire. Là encore on a eu une sorte de "bifurcation" : de deux voies possibles d'exploration des conséquences de la découverte du modèle de l'opéron, une seule a été développée. Est-ce à dire qu'elle est la seule utile ? Que l'autre était un leurre ? Ou est-ce à dire qu'une voie possible est encore plus que largement inexplorée, et qu'elle pourra peut-être permettre de répondre aux questions que la biologie moléculaire laisse sans réponse. Ces questions commencent à se poser de façon tout à fait officielle. Voici par exemple ce qu'écrit François Gros (1993) : *"Mais si j'ai dit que la démarche descendante vers le moléculaire, vers l'atome constitutif du vivant avait également quelque chose d'illusoire, c'est bien évidemment, parce que, au fil de l'évolution des molécules abiotiques, après des millions et des millions d'années, le vivant, résultat d'épreuves et de choix successifs,*

est devenu un ensemble extraordinairement intégré. Intégré par rapport à lui-même et par rapport au non-vivant. ... Ainsi donc, ayant remarquablement démonté la mécanique, il nous faut non seulement la remonter mais étudier à nouveau comment elle fonctionne. Ou, pour employer l'image qui nous est chère, le spéléologue doit refaire surface à partir des entrailles de la cellule. Il est temps d'analyser, d'observer celle-ci dans son véritable contexte, merveille de communication, d'échanges, d'intégration. Il est temps de redevenir physiologistes, forts de notre voyage au centre de la cellule, afin de contempler, de comprendre et d'aimer la magnifique diversité du monde vivant pris dans son ensemble. Notre façon d'en embrasser l'ampleur et la qualité ne sera certes plus la même..."

doit-on rejeter
l'outil
mathématique
nouveau au nom
des dérives qu'il
peut entraîner
ou peut-on
se garder de
ces dérives
lorsqu'elles
sont une
conséquence
d'une utilisation
idéologique ou
philosophique
abusive de
cet outil ?

On peut aussi lire à ce propos l'ouvrage récent d'Atlan (1999) : *La fin du tout génétique*. Mais cette voie implique vraisemblablement une approche pluridisciplinaire incluant l'utilisation (au moins sous forme de métaphore) de formalismes non linéaires, en dépit de tous les obstacles idéologiques qu'A. Danchin souligne. Doit-on rejeter l'outil mathématique nouveau au nom des dérives qu'il peut entraîner chez certains, doit-on l'utiliser en dépit de ces dérives ou peut-on se garder de ces dérives si elles ne sont qu'une conséquence d'une utilisation idéologique ou philosophique abusive de cet outil ?

C'est là que surgit à nouveau le problème du déterminisme. Le matérialisme (réalisme) qui fonde la science (Lecointre, 1999) telle que la majorité des chercheurs l'entendent, qui fonde notamment la répétabilité des expériences est-il nié par un formalisme non linéaire ? La conception d'états multistationnaires, voire de comportements chaotiques, en biologie menace-t-elle la science ? Les notions d'émergence, d'auto-organisation, qui résultent également de l'utilisation de ces formalismes, et qui remettent en cause (Kauffmann, 1985) l'idée que l'origine de la vie est un hasard totalement improbable qui ne peut s'être produit qu'une fois (Monod, 1970), sont-elles seulement un jouet permettant de dépenser les crédits de la NASA, ou sont-elles utiles d'un point de vue heuristique ?

Janine GUESPIN-MICHEL
Camille RIPOLL
Institut fédératif de recherche sur les Systèmes
Intégrés,
Faculté des sciences, Université de Rouen

BIBLIOGRAPHIE

- ATLAN, H. (1979). *Entre le cristal et la fumée*. Paris : Le Seuil.
- ATLAN, H. (1999). *La fin du tout génétique : vers de nouveaux paradigmes en biologie*. Paris : INRA éditions.
- CANGUILHEM, G. (1969). *Connaissance de la vie*. Paris : Vrin.
- DAHAN DALMEDICO, A., CHABERT, J.-L., CHEMLA, K. (éds.) (1992). *Chaos et déterminisme*. Paris : Le Seuil, coll. *Points sciences* (P 5).
- DANCHIN, A. (1980a). Règles de réécriture en biologie moléculaire. *Le Débat*, 3, 111-112. Paris : Gallimard.
- DANCHIN, A. (1980b). L'invasion du biologisme. *Le Débat*, 2, 66-81. Paris : Gallimard.
- GELL-MANN, M. (1994). *Le quark et le jaguar*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- GLANSDORFF, P. & PRIGOGINE, I. (1970). *Structure, stabilité et fluctuations*. Paris : Masson.
- GLEICK, J. (1987, traduction française : 1989). *La théorie du chaos : vers une nouvelle science*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- GOLDBETER, A. (1990). *Rythmes et chaos dans les systèmes biochimiques et cellulaires*. Paris : Masson.
- GOODWIN, B. (1994). *How the leopard changed its spots – the evolution of complexity*. Londres : Weidenfeld & Nicolson.
- GROS, F. (1993). *Regard sur la biologie contemporaine*. Folio essais, p. 293.
- GUESPIN-MICHEL, J. (1980). Peut-on parler de biologie théorique? *La Pensée*, 211, 105-118.
- GUESPIN-MICHEL, J. (1998). Réductionnisme et globalisme en biologie. *La Pensée*, 316, 77-91.
- ISRAËL, G. (1992). L'histoire du principe de déterminisme et ses rencontres avec les mathématiques. In A., Dahan Dalmedico, J.-L., Chabert, K., Chemla (éds.). *Chaos et déterminisme*. Paris : Le Seuil.
- JACOB, F. & MONOD, J. (1961). Genetic regulatory mechanism in the synthesis of proteins. *J. Mol. Biol.*, 3, 318-356.
- JACOB, F. (1970). *La logique du vivant*. Paris : Gallimard. (Pp. 14-16)
- KAUFFMAN, S. (1995). *At home in the universe : The search for laws of complexity*. Londres : Penguin Science.
- LAURENT, M. (1999). *La puissance du vivant, dynamique des systèmes biologiques*. Paris : Hermann.

- LECOINTRE, G.(1999). Des scientifiques s'égarent. *Pour la science*, 259.
- MONOD, J. (1970). *Le hasard et la nécessité*. Paris : Le Seuil.
- MURRAY, J. D. (1988). How the leopard gets its spots. *Scientific American*, 258, 62-69.
- MURRAY, J. D. (1993). *Mathematical biology (2nd edition)*. Berlin : Springer.
- NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. (1977). *Self organization in non equilibrium systems*. New York : Wiley and Sons.
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1979). *La nouvelle alliance*. Paris : Gallimard. (P. 159)
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1997). Hasard et nécessité. *Encyclopædia Universalis*.
- RIPOLL, C., GUESPIN-MICHEL, J., NORRIS, V. & THELLIER, M. (1998). Defining Integrative Biology. *Complexity*, 4, 19-20.
- RUELLE, D. (1991). *Hasard et chaos*. Paris : Éditions Odile Jacob.
- SOKAL, A. & BRICMONT, J. (1997). *Impostures intellectuelles*. Paris : Éditions Odile Jacob.
- THOM, R. (1983). *Paraboles et catastrophes*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- THOMAS, R. (1973). Boolean formalization of genetic control circuits *J. theoret. Biol.*, 42, 563-585.
- VIDAL & LEMARCHAND (1988). *La réaction créatrice*. Paris : Hermann.
- Raison présente*, 115 (1995).