

Autour de l'évolution biologique. Réflexions d'un physicien

Evariste Sanchez-Palencia

Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06 et CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

Auteur correspondant : Evariste Sanchez-Palencia, sanchez@dalembert.upmc.fr

Reçu le 19 février 2016

Résumé – Ce texte est la version écrite d'un exposé devant la Société de Biologie le 17 février 2016. Il contient des réflexions d'un scientifique non biologiste sur la problématique de l'évolution biologique, le type de causalité qu'elle met en œuvre et les idées qu'elle suscite, notamment sur le caractère constructif et structurant de phénomènes tels que la prédation, le rôle de la stabilité et des attracteurs. Cela conduit à une réflexion plus vaste sur la dialectique, cadre général des phénomènes évolutifs, qui dépasse la logique formelle de l'instantanéité.

Mots clés : Attracteur / cycle périodique / dialectique / évolution / prédation / stabilité

Abstract – Around biological evolution. Reflections of a physicist.

This text is the written version of a talk at the *Société de Biologie* on February 17, 2016. It contains reflections of a non-biologist scientist on general problems of biological evolution, including the kind of causality involved, the ideas emerging from it, in particular the constructive and structuring character of phenomena such as predation, the role of stability and attractors. This leads to a larger reflection on dialectics, the general framework of evolving processes, which overpasses formal logic and instantaneity.

Key words: Attractors / dialectics / evolution / periodic cycle / predation / stability

1 Introduction

On a l'habitude de dire que les mathématiques sont la reine des sciences. Galilée disait même que « le livre de la science est écrit en langue mathématique ». Mais, et ce n'est pas pour vous flatter, je pense que c'est la biologie qui est la reine des sciences.

La biologie nous interpelle tous par l'intérêt et la portée de son contenu, qui nous touche; la causalité n'y est pas toujours évidente, empiétant souvent avec des interprétations finalistes et des croyances ataviques très solidement implantées. Dans la pratique de l'enseignement et de la diffusion des connaissances la science biologique n'est pas autonome, elle est obligée de déconstruire le non scientifique, de polémiquer sur ce qui n'est pas scientifique. À mon avis, cela conduit parfois à un regrettable mélange de genres et certains scientifiques tombent malheureusement dans des comportements qui rappellent parfois ceux des fondamentalistes religieux. Voilà pourquoi cela me semble utile de vous faire part, en toute confiance, de modes de penser inhabituels. Je suis chercheur; je suis souvent

content de comprendre que je ne comprends pas beaucoup de choses, car c'est pour cela que je cherche. Or, cela m'est arrivé de poser des questions sur l'évolution à des biologistes qui, non contents d'évacuer d'un revers de main ma question sans l'avoir comprise, me traitaient à demi-mots de créationniste. C'est une expérience très pénible, mais cela ne m'a jamais découragé de chercher à comprendre, n'en déplaise à certains scientifiques incapables de discuter sur les points litigieux et sur les chantiers ouverts à la recherche. Gaston Bachelard disait que « Deux hommes, s'ils veulent s'entendre vraiment, ont dû d'abord se contredire. La vérité est fille de la discussion, non pas fille de la sympathie » (Bachelard, 1940).

Je le dis sans ambages, la vulgate darwiniste est très peu convaincante. Je m'explique : « La compréhension simpliste et incorrecte du darwinisme, selon laquelle la nature *par la griffe et par la dent* est le théâtre d'une continuelle lutte pour la survie entre les prédateurs et les victimes, passe complètement à côté de l'aspect productif des êtres vivants ». La

phrase provocatrice qui précède n'est pas de moi, mais du biologiste Richard Lewontin, dans son beau et convaincant petit livre « La triple hélice » (Lewontin, 2003, p. 68). Il y comparait aussi (pp. 88–89) certains biologistes moléculaires aux moines bouddhistes qui répètent leurs mantras. Lewontin prônait, au contraire, *une vision dynamique, souvent constructive de l'évolution*, n'hésitant pas à faire intervenir (p. 119) des équations différentielles, qui conduisent souvent à des états finaux divers suivant les conditions de départ. Tout cela conduit naturellement à une *vision dialectique de la causalité*, sur laquelle je reviendrai. Notons à ce propos que Levins et Lewontin sont les auteurs du livre “*The dialectical biologist*”, où ils développent le même type d'idées sous une autre forme.

2 L'exemple de la prédation

Considérons le phénomène de prédation. Que peut raisonnablement en penser un physicien qui voudrait comprendre ? S'il y a des prédateurs et des proies, c'est un fait que les proies peuvent vivre sans prédateurs, état que l'on peut considérer optimal pour les proies, certainement pas pour les prédateurs. La présence des deux implique un avantage démographique (c'est bien de démographie qu'il s'agit) pour les prédateurs et un désavantage pour les proies ; or, si les proies désavantagées disparaissaient, ce serait ensuite le tour des prédateurs de mourir d'inanition ! Cela est intéressant : du point de vue des prédateurs, l'avantage immédiat tiré de la consommation de proies, si c'est excessif, devient ensuite désavantage médiat (l'hybris entraîne la vengeance de Némésis ou, plus prosaïquement, il faut s'abstenir de tuer la poule aux œufs d'or). Mais pour les proies, la présence de prédateurs est toujours démographiquement nuisible... Que peut-on chercher à optimiser ou à adapter... ? Une relation de symbiose est plus facile à comprendre, car on peut considérer que le paquet formé par les deux espèces est plus adapté que les deux séparés. Peut-être que ce que l'on cherche est une optimisation du total, « du vivant »... Mais tout compte fait, pourquoi n'a-t-on pas optimisé les espèces pour en arriver à une, la plus apte, optimisée par l'évolution ? Que voyons-nous à la place ? Un foisonnement d'espèces, dont certaines disparaissent, certes, mais dont d'autres se diversifient, alors que leur ensemble bouge... .

Sans entrer dans les détails, qui n'ont pas leur place dans cet exposé (voir appendice 1), voici les *équations différentielles décrivant l'évolution démographique d'un modèle de système prédateur-proie* (il s'agit d'une variante du système de Lotka-Volterra, modifié par Kolmogorov) :

$$\begin{cases} x' = x(1 - 0.25x) - cy \operatorname{Tanh}\left(\frac{x}{c}\right) \\ y' = -\beta y + cy \operatorname{Tanh}\left(\frac{x}{c}\right) \end{cases}$$

Les abscisses x et les ordonnées y sont les populations respectives des proies et des prédateurs, x' et y' désignent leurs dérivés par rapport au temps, (ou, si l'on veut, les variations par unité de temps de ces populations). On trouvera à l'appendice 1 une description du modèle mathématique. En partant d'une position initiale, le point représentatif évolue dans le temps suivant les fléchettes de la Figure 1 et décrivant une orbite issue du point de départ.

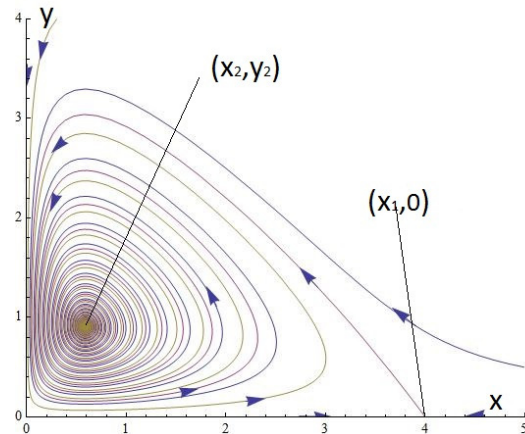


Fig. 1. Orbites pour $\beta = 0.55$, $c = 1.3$.

Cette figure est curieuse et un peu déroutante, du moins lorsqu'on voit ce type de choses pour la première fois. Elle contient énormément d'informations diverses, qu'il convient d'interpréter et comprendre, ce qui, bien entendu, ne manque pas de poser de nouvelles questions ; mais cela ne doit pas effrayer le chercheur. Voici une solution $x(t)$, $y(t)$ en fonction du temps ; elle tend vers un état d'équilibre après avoir oscillé autour (après un phénomène transitoire).

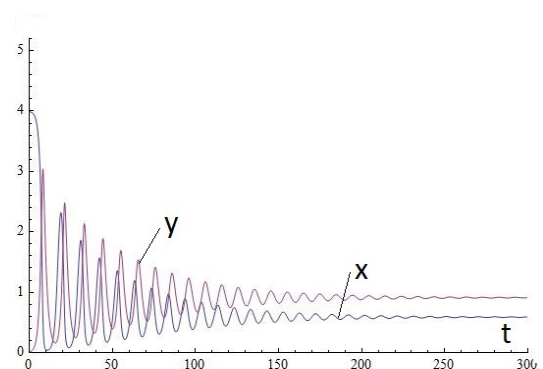


Fig. 2. Une solution en fonction du temps. Les populations tendent vers l'équilibre (X_2, Y_2) . Valeurs des paramètres : $\beta = 0.55$, $c = 1.3$.

En fait, il y a trois points d'équilibre (Fig. 1) : l'origine (les deux populations sont nulles), le point $(X_1, 0)$ qui est l'équilibre naturel des proies seules avec leurs ressources et le (X_2, Y_2) , qui est celui que l'on cherchait en fait, contenant deux populations non nulles de proies et de prédateurs.

Essayons de comprendre la Figure 1 ; on se place d'abord sur l'axe des X , c'est à dire, on considère les proies dans leur milieu en absence de prédateurs. Il y a une position d'équilibre $(X_1, 0)$ (équilibre des proies avec leurs ressources) : si l'on met une population plus petite, elle proliférera jusqu'à atteindre celle d'équilibre, et naturellement, si l'on met initialement une trop grande population, elle dépérira par manque de substances jusqu'à atteindre celle d'équilibre. On comprend bien que $(X_1, 0)$ est stable dans l'axe des x . L'origine aussi est une position d'équilibre, instable dans cet axe, car naturellement, en mettant une petite population, elle prolifère, comme on vient de dire, jusqu'à X_1 .

Ajoutons maintenant le prédateur y . On passe de l'axe des x au plan X, Y . Si le prédateur y est tout seul (sans les proies, dont il se nourrit), on est sur l'axe des y ; la population ne peut que disparaître : l'origine est donc un équilibre stable (le seul) sur cet axe. Il apparaît donc que l'origine est un point d'équilibre qui est stable sur l'axe des Y (et instable sur l'axe des X , comme nous avons vu ci-dessus). D'après la définition mathématique, il est instable dans le plan, c'est un col ; on comprend la forme des orbites près de ce point (elles descendent en se déplaçant vers la droite). Et qu'advient-il de l'équilibre $(X_1, 0)$ des proies seules ? On comprend facilement (mais je reviendrai plus tard sur ce point, qui implique des considérations très intéressantes) que, en ajoutant un petit nombre de prédateurs, ceux-ci sont très bien nourris par les proies disponibles, ce qui fait que leur population prolifère. Ce point, qui était stable dans l'axe X est en fait instable dans le plan, c'est aussi un col, avec les stabilités et instabilités renversées par rapport à l'origine, ce qui explique la forme des orbites dans son voisinage.

Et, bien entendu, il y a aussi le point (X_2, Y_2) d'équilibre des prédateurs avec les proies. Dans le cas spécifique de la Figure 1 (c'est-à-dire, pour ces valeurs des paramètres) il est un équilibre stable (au sens bidimensionnel de X et Y). Plus exactement, c'est un attracteur de tout le plan (à l'exception des axes, dont les attracteurs sont les deux autres équilibres) si bien que, en partant de deux populations initiales non nulles, le système converge vers ce point. Cette figure est curieuse dans son approche à la position d'équilibre. Pourquoi le point représentatif des deux populations tourne-t-il autour de l'équilibre comme s'il hésitait, au lieu d'y aller franchement ? C'est facile à comprendre. Essayons de voir quelle est l'allure des courbes un peu à droite du point d'équilibre (cela

signifie que le nombre de proies est un peu supérieur à celui de l'équilibre et celui des prédateurs exactement égal à celui de l'équilibre. Il est clair que les prédateurs ont plus à manger que ce qu'il leur faut pour maintenir leur population d'équilibre, si bien que leur population va augmenter. Cela signifie que la trajectoire progresse avec des y croissants (du bas vers le haut). Le contraire (pour les mêmes raisons) se produit à gauche du point d'équilibre : la trajectoire progresse en descendant. Et que se passe-t-il en haut et en bas du point d'équilibre ? Eh bien, en haut il y a trop de prédateurs, ils vont consommer plus qu'à l'équilibre et la population des proies va diminuer : la trajectoire progresse de droite à gauche. Bien entendu, au-dessous de l'équilibre, la trajectoire progresse de gauche à droite. Voilà pourquoi la trajectoire tourne autour, au lieu d'y aller directement !

Notons que le raisonnement qui précède montre que *la trajectoire tourne en spirale autour de l'équilibre, mais il ne montre pas qu'elle s'approche de l'équilibre* (autrement dit, il n'est pas évident que l'équilibre soit stable), elle pourrait tout aussi bien s'en éloigner en tournant. En fait, *le choix entre ces deux possibilités dépend des paramètres précis du problème* (taux naturels de naissances et décès, taux de consommation des proies et autres). *Il se peut très bien que l'équilibre soit instable et que la trajectoire s'en éloigne. Dans ce cas, l'éloignement ne peut pas être indéfini* (à cause de la limitation globale des ressources), *et il y a un cycle stable entourant l'équilibre. L'attracteur du système est une solution périodique : le système ne tend pas vers l'équilibre, mais se met à palpiter indéfiniment autour.* On note que l'approche du cycle peut s'effectuer de l'extérieur ou de l'intérieur, suivant la position initiale. Dans le cas spécifique des Figures 3 et 4, le plafond de saturation des prédateurs est plus élevé que dans le cas des Figures 1 et 2.

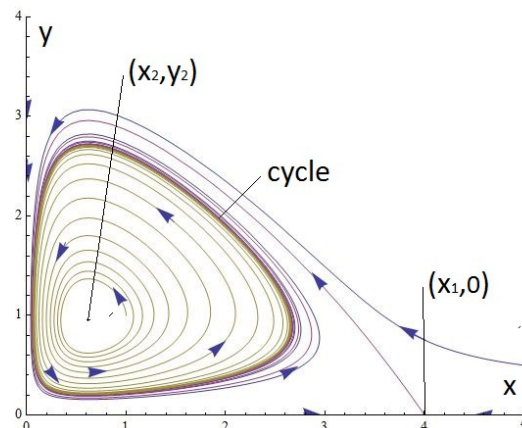


Fig. 3. Orbites pour $\beta = 0.55$, $c = 1.01$.

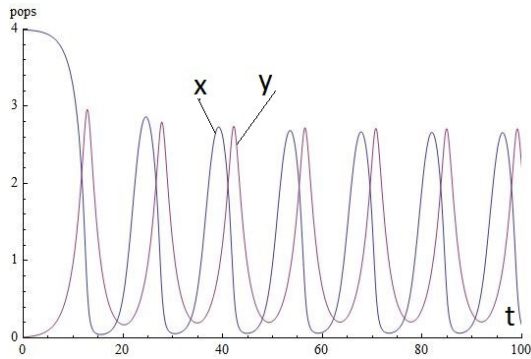


Fig. 4. Une solution en fonction du temps. Après un transitoire, les populations tendent vers une oscillation périodique. Valeurs des paramètres : $\beta = 0.55$, $c = 1.01$.

Dans ce cas spécifique, il y a toujours trois points d'équilibre, mais aucun n'est stable, l'attracteur est une orbite périodique. Mais la propriété de tourner autour de l'équilibre est conservée. Elle est inhérente à la prédation.

Bien entendu, dans le cas d'une symbiose entre x et y au lieu d'une prédation (cas qui ne sera pas traité explicitement ici) les choses se passent bien autrement ! La symbiose présente des propriétés de symétrie entre x et y (chacun profite de l'autre) alors que la prédation est antagonique (le prédateur profite de la proie, mais la proie subit le préjudice infligé par le prédateur).

On trouvera à l'appendice 2 divers compléments propres à mieux situer le modèle de prédation utilisé et ses conséquences.

Cet exemple est très difficilement interprétable en termes d'« avantages », « désavantages » et « adaptation ». Qu'en est-il de la survivance des plus aptes ? Aptes à quoi ? En fait ça marche ensemble, avec des dosages adéquats des uns et des autres, de façon stable (il y a un attracteur !); dans le cas des cycles, c'est un peu déroutant, il y a un va-et-vient comme si l'on n'arrivait pas à arriver, ce qui est vrai, mais, finalement cela marche, à chaque fois qu'une des deux populations périlclite, elle arrive à s'en remettre et c'est l'autre qui périlclite ! Somme toute, *il n'y a pas de plus ou moins adaptés, c'est une société qui marche, ou un système écologique cohérent, avec des va-et-vient, qui peut converger (cela dépend des valeurs des paramètres) soit vers un équilibre, soit vers une palpitation indéfinie...*

Si vous trouvez que ce résultat offrant deux configurations suivant les valeurs des paramètres est un peu compliqué, voici une boutade mnémotechnique : chacun sait que dans les sociétés capitalistes avancées il y a des prédateurs et des proies, sans pour autant que ces sociétés soient toutes semblables. Certains sujets de Sa Gracieuse Majesté ajoutent que la

société britannique tend vers un équilibre, alors que la société française tend vers un cycle; d'après eux, la France est toujours soit en avance, soit en retard, jamais à l'heure, ce qui explique les révolutions qui jalonnent son histoire, dont elle se remet toujours pour recommencer de plus belle !

Les systèmes dynamiques ne tendent pas vers une quelconque optimisation d'une propriété ; cela peut effectivement arriver dans certains cas, mais, en général, ils tendent... vers leur attracteur (cette affirmation est parfaitement tautologique!), qui peut être un point d'équilibre, un cycle périodique (dit endogène : engendré par le système lui-même, sa période étant absente des données imposées) ou même d'autres structures plus complexes (y compris les attracteurs étranges pour les systèmes mettant en œuvre au moins trois variables). Ces structures émergentes (parfois dynamiques, comme le cycle) ne sont pas faciles à déceler autrement que par le calcul numérique sur ordinateur, mais on peut parfois prévoir leur existence si les points d'équilibre sont tous instables (c'était le cas de la Fig. 3).

3 Autres commentaires et réflexions

Les considérations précédentes concernent naturellement des systèmes (dits *autonomes*) dont le mode de fonctionnement est fixé (les équations différentielles ne contiennent pas explicitement le temps). D'autres types de phénomènes peuvent intervenir dans le cas contraire, par exemple si l'on tient compte de variations environnementales, mutations en cours ou tout autre. On peut se faire une idée du comportement dans ces cas en considérant une suite de solutions d'équations différentes pendant des temps limités (modifications échelonnées); il est clair que dans ce cas ce ne sont pas les attracteurs qui sont pertinents, mais des portions des *transitoires* des solutions.

La propriété citée, selon laquelle le point $(X_1, 0)$ est stable dans l'axe X mais instable verticalement, mérite un approfondissement. Elle résulte du fait qu'un petit nombre de prédateurs en contact avec la population d'équilibre des proies seules sera bien nourri et proliférera. Le traitement mathématique du problème montre facilement que cette propriété n'existe pas pour n'importe quelles valeurs des paramètres, il faut que celui exprimant l'avantage tiré des proies par les prédateurs soit suffisamment grand. Cela se comprend facilement : le mécanisme de prédation doit être suffisamment efficace pour que, du moins dans ces conditions optimales pour les prédateurs, le bénéfice démographique compense au moins leur mortalité naturelle. C'est tout à fait naturel et il semble idiot de le rappeler : tout mécanisme d'alimentation qui n'arrive pas (dans les meilleures conditions) à compenser la

mortalité naturelle de l'espèce rend celle-ci non viable ! Mais cette propriété, tout naturelle qu'elle soit, pose des problèmes très intéressants. Est-il possible qu'un prédateur apparaisse le long de l'évolution graduellement, par des petites retouches, à partir d'une espèce se nourrissant des mêmes ressources que leurs futures proies ? Une étude de cette question, que je ne rendrai pas explicite ici, sans aboutir à l'impossibilité, montre le caractère hautement improbable d'un tel processus. Vraisemblablement (ces indications doivent être prises à titre indicatif), c'est une toute autre démarche qui a été suivie : le prédateur n'apparaît pas graduellement, mais par un mécanisme relevant de ce que François Jacob (1981) appelait « le bricolage de l'évolution » : le futur prédateur s'est vraisemblablement développé (de façon graduelle ou pas) dans un autre habitat et en complète indépendance des futures proies ; ses potentialités en matière d'alimentation ne visaient nullement une future prédation, c'est à la faveur d'une modification extérieure des habitats qu'il s'est retrouvé privé de ses ressources naturelles et en contact avec des nouvelles proies potentielles, muni d'un instrument tout prêt ou du moins permettant une rapide adaptation opportuniste (c'est le bricolage !)

Précisons que *les considérations qui précèdent ne donnent nullement des recettes magiques pour comprendre l'évolution du vivant*. Il s'agit tout simplement de signaler comment des concepts tels que *stabilité et attracteur, faisant souvent émerger des entités structurées (figées ou palpitantes) sont souvent des outils pour comprendre l'évolution bien plus efficaces que l'invocation d'une lutte pour la survie des plus adaptés*. Ce n'est pas le triomphe de je ne sais quel tournoi entre configurations possibles, mais l'aboutissement (l'attracteur) du mouvement défini de façon déterministe par les équations écrites. Bien entendu, on peut toujours sauver les principes en interprétant « adaptation » au sens de « adéquation à l'attracteur », ce qui constitue une tautologie peu constructive et sans force démonstrative.

Après avoir compris les mécanismes en jeu dans le système prédateur-proie, il convient de dégager les raisons profondes des particularités des comportements observés. Elles sont les suivantes :

1. les équations sont différentielles. Celles-ci ne sont pas des relations numériques, mais des lois de tendance évolutive. *Les effets ne suivent pas instantanément les causes* : le système a une sorte d'*inertie* (Le fait de se nourrir mieux n'implique pas une augmentation instantanée de la population des prédateurs, mais une augmentation de leur taux de natalité, dont les effets se feront sentir plus tard).
2. il y a *opposition de tendances entre les agents en jeu* (prédateurs et proies). On note que les termes d'interaction ont des signes opposés dans les deux

équations, ce qui est avantage pour les uns est inconvénient pour les autres. Il y a « contradiction des intérêts des uns et des autres », mais naturellement, *il ne s'agit pas d'une contradiction au sens d'impossibilité logique, mais d'opposition des tendances naturelles*.

En fait, *les systèmes dynamiques peuvent dans certains cas choisir une espèce, la plus adaptée, au détriment d'une autre, mais souvent, surtout quand il y a opposition de tendances entre les divers agents, ils construisent des structures complexes stables, soit statiques, soit palpitantes : c'est la force créatrice de la contradiction*.

Ce qui précède constitue un bon point de départ pour dépasser une problématique biologique pour comprendre les divers types de causalité et les relations entre la logique formelle et la dialectique.

4 Les limitations de la logique formelle et le rôle du temps

La logique formelle ou logique mathématique est la logique de l'instantanéité ou de l'intemporalité. Elle est étroitement liée à notre interprétation du verbe « être » ; nous reviendrons d'ailleurs sur ce point. La logique se veut détachée du contact du monde physique, ne concernant que des relations abstraites entre éléments formels auxquels, en vue des applications, on peut donner des contenus (physiques ou autres) arbitraires. En fait, elle émane par abstraction d'un type de relations extrêmement répandues mais dont l'utilité est souvent limitée si elle ne plonge pas dans un contexte plus vaste. La logique sert en général (et est indispensable !) à créer des liaisons locales extrêmement rigoureuses, mais souvent elle ne donne pas toute seule des raisonnements novateurs et éclairants. *Elle ne prend pas en considération le temps, et accepte le « principe du tiers exclu », qui s'énonce en disant qu'une affirmation est vraie ou fausse, toute troisième possibilité étant exclue*. C'est tout un programme, en ce sens qu'il *délimite un domaine d'application d'où le temps est exclu, et avec lui le devenir*.

Quelle est le domaine d'application de la logique formelle ? Ce sont les choses intemporelles, telles que « le tout est plus grand que les parties » et bien d'autres. C'est incontestable, par définition de « tout » et « parties » ; apparemment, cela n'a rien à voir avec le temps. Est-ce si sûr ? Essayez d'appliquer cette « vérité universelle » à une famille et à ses composants. Que voit-on ? Que cela n'a rien d'intemporel, on ne peut faire de la logique rigoureuse qu'à un instant fixé. *C'est de la fausse intemporalité, c'est de l'instantanéité. Une fois qu'on a restreint le domaine d'étude à un instant, le temps a disparu, et on a l'impression de l'intemporalité et de l'universalité. C'est très*

réducteur, et c'est pour cela qu'on a de la logique partout, mais le plus souvent pas toute seule.

Je disais que la logique formelle était liée à notre idée du verbe « être ». C'est une façon de parler, car pour préciser cela il faudrait avoir une définition précise du verbe être, ce qui me semble utopique. Mais il est clair que l'on admet sans peine que « être » et « ne pas être » s'excluent l'un l'autre, et ne laissent pas de troisième possibilité. C'est pratiquement le *principe du tiers exclu*, alors que des verbes tels que « devenir », « évoluer », « vieillir », ou « s'épanouir » se marient mal avec le tiers exclu, sans pour autant être nécessairement incompatibles avec lui.

La pensée de la logique formelle est une pensée de l'instantanéité, dont le péché d'orgueil, très répandu chez les penseurs, consiste à se considérer une pensée de l'intemporalité, engendrant ainsi un idéalisme ontologique, alors même que la limitation du programme constitue un agent inhibiteur et castrateur.

Cette distinction me semble importante. *L'instantanéité est une section de l'espace-temps par $t = \text{constante}$. Cette section peut contenir des éléments entiers et des relations entre eux, mais elle n'est pas complète, en ce sens que la cohérence causale avec d'autres éléments demande un passé qui la précède avec des causes et un futur porteur de ses conséquences. L'intemporalité nie le besoin de ces compléments, se veut autonome et complète, ce qui la plonge dans une atmosphère irréaliste, embrumée par les limitations qu'elle-même s'impose.*

5 La pensée dialectique ou pensée du complexe

Les considérations qui précèdent ouvrent la voie à la *dialectique*, que l'on peut définir comme le *cadre général où s'inscrivent les phénomènes évolutifs*. Ceux-ci font le plus souvent intervenir *plusieurs agents en interaction*, raison pour laquelle on la désigne parfois par *pensée du complexe*. L'opposition de tendances (antagonisme) entre les agents impliqués y joue un rôle très important, à tel point que certains définissent la dialectique comme une théorie de la contradiction. La raison en est que, de toute évidence, elle est loin d'une logique stricte faisant intervenir le principe du tiers exclu. Mais il s'agit là d'un énoncé alambiqué et déroutant si l'on ne fait pas la remarque fondamentale que *le terme 'contradiction' doit être compris justement comme opposition de tendances (antagonisme) lors de l'évolution et non pas comme impossibilité logique*. De même, *l'identité des contraires* ou *unité dialectique*, terme déroutant souvent considéré comme l'un des principes de la dialectique, doit être comprise au sens d'*interdépendance* ou *causalité interactive*, à l'instar de l'exemple traité des prédateurs et des

proies, dont seule la prise en considération simultanée des deux agents permettait d'en dégager la structure causale et fonctionnelle.

La pensée dialectique constitue un cadre (façon de penser les phénomènes naturels) propre à maîtriser la cohérence cachée de maintes situations (scientifiques ou autres) qui paraissent incongrues ou inintelligibles du point de vue d'une logique stricte. Elle n'est pas une science, mais une méthode; ses « principes » *ne sont nullement des lois strictes et contraignantes*, bien au contraire, *ce sont des tendances générales qui se dégagent de l'étude de problèmes concrets*.

Les principes de la dialectique sont, en quelque sorte, des descriptions synthétiques des traits généraux rencontrés dans l'étude d'exemples concrets, et, en tant que tels, *sujets à révision, modification et perfectionnement*. Notons que la plupart de ces principes peuvent être envisagés comme des idées-forces qui se dégagent de la théorie mathématique des systèmes dynamiques (autrement dit, des équations différentielles non linéaires). On consultera à ce propos Sanchez-Palencia, 2012, chapitres VI et VII.

Voici une relation de ces principes (dont nous avons supprimé les classiques « mouvement et transformation » et « action réciproque », que nous venons d'intégrer dans la définition même de la dialectique) :

- a – *La contradiction, force créatrice.*
- b – *Le passage du quantitatif au qualitatif (bonds, ruptures et émergence).*
- c – *La négation de la négation : thèse, antithèse et synthèse (ou principe du développement en spirale).*
- d – *Pour les systèmes évolutifs faisant intervenir plus de deux agents, des phénomènes de chaos déterministe peuvent intervenir, donnant lieu à des mouvements erratiques près de l'attracteur (mais non pas erratiques partout).*

Nous ne reviendrons pas ici sur le principe a, parfaitement illustré ci-dessus par l'exemple du système prédateur-proie, ni sur le c, grand classique de la méthode dialectique, qui en assure l'utilité : c'est l'étude synthétique des éléments contradictoires qui permet souvent d'en comprendre la structure et le fonctionnement (leur évolution).

Quant au principe d, qui ne concerne que les systèmes évolutifs faisant intervenir plus de deux agents, et qui sort entièrement du cadre de cet exposé, je signalerai pourtant que, aussi déroutants que soient les termes « chaos » et « imprévisibilité » (ou « comportement erratique »), le premier ne constitue nullement une faillite du déterminisme, et la dernière *ne concerne qu'un certain éventail de possibilités (qui constituent l'attracteur du système)*, bien loin d'un *arbitraire généralisé*. On peut penser en tant qu'exemple à un feu de bois dans une cheminée, dont les propriétés

globales sont parfaitement prévisibles, alors que la cadence des flammes et la configuration exacte de chacune d'elles sont imprévisibles.

Commentons b (passage du quantitatif au qualitatif, bonds, ruptures et émergence). Les sciences constituent un domaine privilégié pour comprendre ce principe. Il y a dans la nature des *niveaux d'abstraction*, à chacun desquels correspond une cohérence et un type de causalité qui leur sont propres. Ainsi, la sociologie est indépendante de la biochimie ou de la théorie atomique, alors que les hommes, agents de la sociologie, sont des systèmes biochimiques ou des agrégats d'atomes. Bien entendu, il serait difficile de décrire des phénomènes sociaux en termes du comportement des atomes. Ce serait compliqué, alors que *nous ne pouvons appréhender de façon intelligible que des choses simples*. Fort heureusement, dans le magma des phénomènes naturels, certains présentent des analogies permettant d'en dégager des modèles et des lois approchées de leur causalité et de leur évolution. Ce sont des abstractions cohérentes et utiles. La sociologie, la biochimie et la théorie atomique sont des niveaux d'abstraction cohérents et intelligibles. Le concept de *simplexité* (Berthoz, 2009) est très utile à ce propos : il ne s'agit pas de simplicité, *la simplexité est ce qui dégage de la simplicité intelligible à partir d'une complexité inconnaissable*. On peut dire aussi qu'elle dégage un niveau d'abstraction (de simplification) intelligible.

La vraie nature de *la connaissance scientifique est approchée et évolutive, essayant toujours de cerner la nature, ses propriétés et ses modes de transformation*. Les sciences avancent (malheureusement cela arrive parfois qu'elles rétrogradent) à la recherche d'une perfection inatteignable. Bien entendu, *il ne faut pas confondre les modèles simplifiés que nous construisons pour rendre intelligible telle ou telle parcelle de la réalité avec la réalité elle-même*. Il faut toujours revenir à la nature, à l'expérimentation, *ne pas prendre les modèles pour la réalité (ce qui constitue une dérive philosophiquement idéaliste)*. L'exemple traité ci-dessus de la prédation illustre ce point : *le modèle des équations différentielles nous permet de comprendre certaines facettes du phénomène, mais il ne le remplace nullement*. Il est donc entendu que la prédation est la prédation et non pas un système d'équations différentielles (quelle que soit l'utilité de celui-ci pour comprendre des propriétés de la prédation).

On trouvera dans la bibliographie, outre les ouvrages cités, une liste (nullement exhaustive) de références relativement récentes concernant la dialectique dans les sciences.

Nous voyons donc comment une réflexion sur la biologie, son rôle et ses méthodes constitue une excellente base de départ pour de bien plus vastes

considérations scientifiques ou même philosophiques sur la causalité, la dialectique et les systèmes dynamiques. Voilà pourquoi, comme j'affirmais au début de cet exposé, je pense que la biologie est la reine des sciences.

Appendice 1 : Description du modèle mathématique

Il s'agit d'un des modèles du système prédateur-proie, dont il y a une grande variété. La signification des divers termes des équations est la suivante. En prenant $y = 0$ (seules les proies sont présentes) on a l'équation démographique dite « logistique » $x'/x = 1 - 0.25x$, où le taux de croissance naturel de la population est positif pour $x < x_1$ et négatif pour $x > x_1$, où x_1 est donc la population d'équilibre des x avec les ressources du milieu. On a pris ici les unités de mesure des x et du temps telles que $x_1 = 4$ et le taux de croissance dans les conditions optimales égal à 1. À leur tour, les prédateurs y en l'absence de proies ont un taux de décroissance égal à $-\beta$. L'interaction démographique entre les x et les y est décrite par le terme $cy \operatorname{Tanh}(\frac{x}{c})$, qui exprime la quantité d' x prélevée par prédation par unité de temps. Ce terme est le classique xy de Lotka-Volterra (proportionnel aux rencontres fortuites des x et des y pour x petit), mais plafonné à un seuil cy pour x grand (saturation des prédateurs). Ce terme est le même en tant que destruction des x et de création des y ; le taux de transformation est égal à 1, ce qu'on peut toujours obtenir en choisissant convenablement l'unité de mesure des y . On trouvera dans Murray (2002) des développements plus généraux sur ces questions.

Appendice 2 : Compléments sur la prédation

Pour voir plus clair dans l'exemple prédateur-proie, on peut considérer une variante de ce qui précède faisant intervenir, en même temps que les proies, une troisième espèce z , en tout point analogue aux proies x , mais non consommables par les prédateurs (on peut penser, en tant qu'exemple/modèle, à des animaux vaccinés z , et non vaccinés x , les y étant les virus correspondants). Dans ce cas, l'attracteur est l'équilibre des z avec leurs ressources : aussi bien les vraies proies que les prédateurs disparaissent. Cela se comprend facilement : les z ont un avantage démographique (non compensé) par rapport aux x , si bien que ceux-ci disparaissent, et avec eux, ensuite les prédateurs, faute de ressources.

Notons qu'il y a bien des variantes des schémas de prédation décrits ici. On trouvera par exemple dans Lherminier and Sanchez-Palencia (2015) un exemple avec deux prédateurs où l'attracteur est un cycle

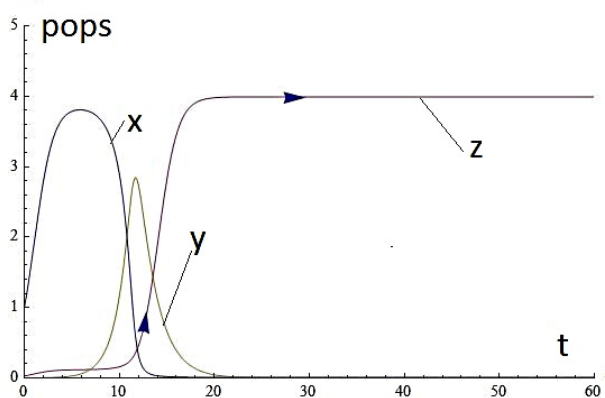


Fig. 5. Les populations x et y disparaissent, seule z reste, en équilibre avec ses ressources.

périodique stable qui n'est pas généré par l'instabilité d'une position d'équilibre avec populations non nulles, laquelle n'existe pas du tout. Il s'agit d'une coexistence stable essentiellement dynamique. Il convient également de signaler que ce type de phénomènes peut parfois être révélé par une petite perturbation à l'intérieur d'une espèce en équilibre (voir Sanchez-Palencia & François, 2013, 2015).

Références

- Bachelard, G. *La philosophie du non*, Presses Universitaires de France, 1940
 Berthoz, A. *La simplicité*, Odile Jacob, 2009.

- Brohm, J.M. *Les principes de la dialectique*, Editions de la Passion, 2003.
 Guespin-Michel, J. *Les bactéries, leur monde et nous. Vers une biologie intégrative et dynamique*. Dunod, Paris, 2011.
 Guespin-Michel, J., and Sève, L. (coordinateurs) *Emergence, complexité et dialectique*, Odile Jacob, 2005.
 Jacob, F. *Le jeu des possibles*, Fayard, 1981.
 Levins, R., and Lewontin R. *The dialectical biologist*, Cambridge University Press, 1985.
 Lewontin, R.C. *La triple hélice*, Seuil, Paris, 2003.
 Lherminier, Ph., and Sanchez-Palencia, E. (2015). Remarks and examples on transient processes and attractors in biological evolution, *Electronic J Differential Equations*, Conference 22. 63-77.
 Murray, J.D. *Mathematical biology : I. An Introduction*, third edition, Springer, 2002.
 Ollman, B., and Sève, L. (coordinateurs) *Dialectiques aujourd'hui*, Syllepse, 2006.
 Sanchez-Palencia, E. *Promenade dialectique dans les sciences*, Hermann, 2012
 Sanchez-Palencia, E., and François, J.-P. (2013) Structural instability and emergence of biodiversity, *Acta Biotheoretica*, 61, 397-412.
 Sanchez-Palencia, E., and François, J.-P. (2015), Constrained evolution processes and emergence of organized diversity, *Math Meth Appl Sci* (wileyonlinelibrary.com), DOI :10.1002/mma.3463.
 Sève, L. (coordinateur) *Sciences et dialectiques de la nature*, La Dispute, 1998.