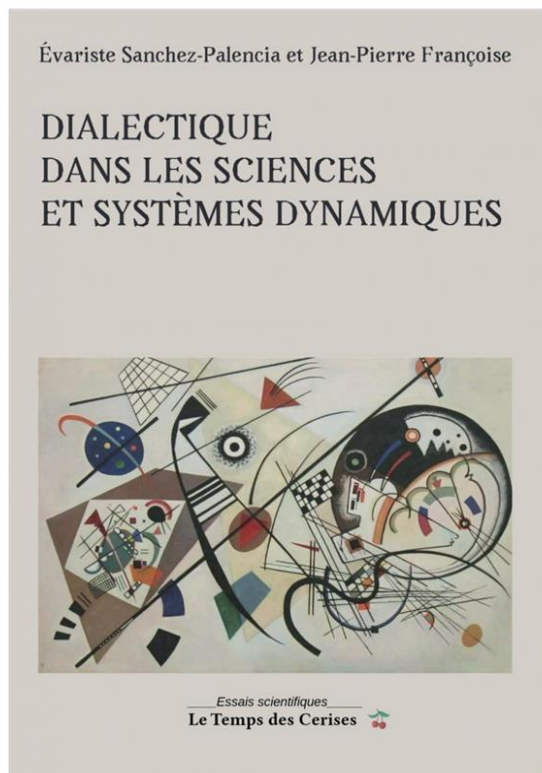


*Le but de cet exposé est de faire une présentation du livre:*

# ***Dialectique dans les sciences et systèmes dynamiques*** *par* ***Evariste Sanchez-Palencia<sup>1</sup> et Jean-Pierre Francoise<sup>2</sup>***

*Le temps des cerises (sortie le 20/1/2023), 313 p.*



---

<sup>1</sup> Directeur de recherche émérite au CNRS. Membre de l'Académie des Sciences (section des Sciences mécaniques et informatiques).

<sup>2</sup> Professeur émérite (Mathématiques) à Sorbonne-Université

## Préface des auteurs

*La compréhension simple et incorrecte du Darwinisme, qui, par la griffe et par la dent est le théâtre d'une lutte continue pour la survie entre les prédateurs et leurs victimes passe complètement à côté de l'aspect productif des êtres vivants.*

*(Richard Lewontin, (1929 - 2021) « La triple hélice, Les gènes, l'organisme, l'environnement »)*

*Ce livre est le fruit d'une réflexion sur un certain nombre de problèmes de systèmes dynamiques (notamment en dynamique écologique) développés ou revisités dans le but de comprendre les éléments de l'évolution biologique qui sortent de l'élémentaire survivance des plus aptes, et plus précisément qui engendrent des structures nouvelles, souvent dynamiques, que certains appellent émergentes. Cela permet d'expliquer comment des mécanismes naturels sans le moindre finalisme conduisent à la formation de configurations stables de nature variée, constante ou pulsante, mettant en œuvre une diversité d'espèces en interaction. Le rôle de la stabilité est présent partout, et conduit à des phénomènes remarquables, comme les synchronisations spontanées, les communautés d'espèces purement dynamiques (sans point d'équilibre, stable ou pas) et bien de comportements qui apparaissent comme paradoxaux du point de vue de l'optimisation (dont le rôle est restreint en théorie des systèmes dynamiques). Cela conduit naturellement à une réflexion synthétique de nature épistémologique pour dégager des idées générales permettant de mieux appréhender la causalité mise en œuvre dans l'évolution biologique.*

Les diverses contributions disparates qui constituent ce livre peuvent se regrouper en deux parties : questions épistémologiques (s'appuyant partiellement sur des éléments des systèmes dynamiques) et questions des systèmes dynamiques (en vue d'une interprétation épistémologique). Cela conduit naturellement à une présentation en deux parties, *A- Eléments d'épistémologie dialectique* et *B- Comment la dialectique émane des systèmes dynamiques*, que l'on peut interpréter aussi bien comme une collection de propos épistémologiques A, suivie d'un long appendice B permettant d'en étayer certaines idées, que comme une collection de questions de systèmes dynamiques B précédée d'une introduction A qui oriente le choix des problèmes traités. Le mode de lecture est largement ouvert, il s'agit d'un recueil et non pas d'un traité.

## ***Partie A.- Eléments d'épistémologie dialectique***

### **Chap 1. La science est-elle exacte ou approchée ?**

#### ***1.1. Chute de corps : pièces de monnaie, feuilles, chats***

Dans la vie courante, l'adjectif « scientifique » a souvent les connotations « exact, sérieux, objectif », ou « mettant en œuvre des moyens difficilement contestables ». Mais en fait, d'une façon générale, la connaissance scientifique n'est pas exacte, mais approchée<sup>3</sup>. Les théories nous permettent de comprendre approximativement des parcelles de la réalité, et la recherche consiste principalement en un travail d'élaboration et d'amélioration des théories. C'est ce qu'on propose de montrer avec un exemple, celui de la chute des corps ; on connaît (un peu...) trois types de chute (il y en a probablement bien d'autres) :

1-Chute des petits corps denses (pièces de monnaie et autres)

2-Chute des feuilles (d'arbre ou de papier)

---

<sup>3</sup> Le cas des sciences dites exactes (mathématiques) est spécial, et sera traité au chapitre 4\$.

### 3-Chute des chats (censés tomber sur leurs pattes)

## **1.2. Théories et modèles**

La science est notre connaissance de certaines parcelles de la nature et de leur évolution. Contrairement aux apparences, les lois scientifiques sont simples (en tout cas bien plus simples que l'infinie variété des questions ouvertes auxquelles elles s'appliquent et apportent des éléments de réponse), de façon à être compréhensibles et manipulables, mais elles ont toujours des domaines d'application partiels, à l'intérieur desquels elles sont approximativement vraies et approximativement utilisables. C'est ce caractère partiel et approché qui suscite de nouveaux sujets de recherche ; la recherche a une vitalité propre nourrie par ses propres limitations ; les chercheurs vivent une insatisfaction constante qui les pousse à perfectionner, à comprendre, à avancer.

C'est aussi la raison pour laquelle, si une théorie explique approximativement un certain type de phénomènes, une expérience contradictoire avec elle ne l'invalide pas automatiquement, elle ouvre la voie à une étude plus fine et plus pertinente. Bien entendu, si l'on arrive à mettre au point une théorie plus fine, celle-ci ne déplace pas nécessairement la précédente; l'ancienne théorie peut parfaitement conserver un domaine de validité (toujours approché).

## **Chap 3. L'épistémologie est-elle naturellement dialectique ?**

### **3.1. Les problèmes d'évolution qui se posent : biologie, mécanique, économie...**

Le phénomène de *prédation* constitue un système relativement simple permettant d'avancer dans ce type de compréhension. S'il y a des prédateurs et des proies, il est clair que les proies peuvent vivre sans les prédateurs, état que l'on peut considérer comme optimal pour les proies, certainement pas pour les

prédateurs. La présence simultanée des deux implique un avantage démographique (c'est en effet de démographie dont il s'agit) pour les prédateurs, et un désavantage pour les proies ; or, si les proies désavantagées venaient à disparaître, ce serait ensuite le tour des prédateurs de mourir de faim ! Cela est intéressant : du point de vue des prédateurs, l'avantage immédiat de la consommation de proies, si celle-ci est excessive, devient désavantage différé (on doit s'abstenir de tuer la poule aux œufs d'or). Mais pour les proies, la présence de prédateurs est toujours démographiquement préjudiciable. Quelle chose peut-on essayer d'optimiser ou adapter ? Le temps, avec des échéances diverses, s'invite dans le problème, qui ne dépend nullement d'une «survie des plus adaptés.

La théorie mathématique des systèmes dynamiques (ou systèmes d'équations différentielles ordinaires, dont il sera largement question dans la partie B de ce livre ; voir aussi l'appendice) ne concerne pas l'optimisation d'une propriété, mais la répétition systématique de certains types de comportement (ces types de comportement opèrent souvent pendant des temps infinitésimaux ; dans ces cas, plutôt qu'une répétition il s'agit d'une suite continue). Cela met en œuvre fondamentalement les concepts de stabilité et d'attracteur, ce qui permet dans certains cas de comprendre la construction de systèmes complexes stables, lesquels ne sont pas nécessairement statiques, présentant souvent des comportements périodiques (ou même apériodiques).

On considère deux populations  $x(t)$  et  $y(t)$  de prédateurs et de proies respectivement, quantités qui varient avec le temps  $t$ . On admet que les proies  $x$  (on peut imaginer des lapins) ont leurs propres subsistances (capacité nutritive de leur habitat), qui leur procurent une population d'équilibre  $P$ . Les prédateurs (renards, par exemple) se nourrissent de proies  $x$  (et n'ont pas d'autres ressources). Il y a alors une diversité de comportements possibles, dépendant des valeurs des paramètres décrivant le fonctionnement du système, ce qui rappelle dans une certaine mesure les divers cas possibles du mouvement des pommes et des comètes.

Le paramètre principal  $e$  est l'efficacité du mécanisme de prédation (qui tient compte de la configuration de l'habitat, camouflage et autres). Si  $e$  est très petit, le phénomène de prédation n'est pas viable ; le système se dirige vers un

équilibre (l'attracteur) qui est simplement  $x = P$  (la population d'équilibre des proies) et  $y=0$  (les prédateurs disparaissent). Cela se comprend facilement: si pour attraper un lièvre on consomme plus d'énergie que celle qu'on obtient en le mangeant, il est clair qu'on ne peut pas se nourrir de lièvres. Il y a donc un seuil de viabilité de  $e$ . lorsque  $e$  est légèrement supérieur à cette valeur, il y a un équilibre stable (un attracteur) avec  $x$  proche de  $P$  (légèrement inférieur) et  $y$  petit. Si l'on augmente la valeur de  $e$  (plus grande efficacité de la prédation), le point d'équilibre se déplace,  $x$  diminue et  $y$  augmente (la population de prédateurs qui peut vivre de ces proies augmente, au détriment de la population d'équilibre des proies), ce qui semble naturel : *l'accroissement de la vulnérabilité des proies (qui équivaut à l'efficacité de la prédation) est un inconvénient pour les proies et un avantage pour les prédateurs*. Mais l'on comprend facilement que, en augmentant l'efficacité  $e$ , les choses ne peuvent pas continuer comme cela indéfiniment, car la population de proies, dont tout dépend, diminuerait dangereusement. Et en fait il en est ainsi: *à partir d'une certaine valeur de  $e$ , l'augmentation de l'efficacité est préjudiciable pour les proies et aussi pour les prédateurs*, ce que la sagesse populaire exprime par «l'avarice rompt le sac», ou «mordre la main qui donne à manger» ou encore «tuer la poule aux œufs d'or». Il s'agit d'un phénomène non linéaire, les résultats ne sont pas proportionnels aux causes, ce qui vide de sa substance l'utilité même de l'augmentation de la vulnérabilité, mais attention! Nous savons précisément que les explications scientifiques ne sont pas finalistes, mais causales. *Le phénomène de prédation n'a rien à voir avec l'intentionnalité des prédateurs, qui n'intervient nullement (comme le mouvement des comètes n'est pas intentionnel)*. C'est pourquoi cela a parfaitement un sens, en tant que question scientifique, de se demander ce qui se passe en augmentant encore la vulnérabilité. A lieu alors ce qu'on appelle une bifurcation de Poincaré-Andronov-Hopf.

Le point d'équilibre concerne des valeurs de plus en plus petites des populations de prédateurs et de proies, mais il n'est plus stable, il n'est plus un attracteur. L'attracteur (le processus vers lequel tend le système) est alors un cycle périodique, qui rappelle précisément les orbites des comètes, qui gravitent autour du soleil sans tomber sur lui. La structure du cycle, que l'on comprend facilement, est la suivante : En partant d'une situation initiale où il y a peu de prédateurs et une population de proies proche à celle son équilibre avec les subsistances de son habitat, comme l'efficacité est grande, les prédateurs prolifèrent à merveille, alors que la population des proies périclité ; lorsque celle-ci est suffisamment petite, les prédateurs ne peuvent plus vivre d'elle, et leur

population se met à diminuer à son tour: on arrive ainsi à deux populations petites; les proies sont alors peu consommées par les rares prédateurs, et comme leur population est très inférieure à celle d'équilibre avec leurs subsistances, elle se met à augmenter, arrivant ainsi à nouveau à la configuration initiale. Et ce processus périodique est un attracteur; on peut partir de valeurs arbitraires des deux populations et le système se met à osciller périodiquement comme on vient de le décrire.

### ***3.2. Premières notions de dialectique et son rapport avec la causalité différée et les systèmes dynamiques***

Avant d'aborder la dialectique, faisons un commentaire sur les limitations de la logique formelle et le rôle du temps:

La logique formelle est la logique de l'instantanéité ou de l'intemporalité. Elle accepte le *principe du tiers exclu* (une affirmation est vraie ou fausse, toute troisième possibilité est exclue. Cela délimite un programme où le temps et le devenir n'interviennent pas. Une fois qu'on a restreint le domaine d'étude à un instant, le temps a disparu et l'on a l'impression de l'intemporalité et de l'universalité, ce qui est très réducteur, car on a laissé de côté les causes efficientes (domaine de la science) qui opèrent du passé vers le futur (flèche du temps). Tout ce qui concerne des verbes tels que «devenir», «vieillir», «épanouir» s'imbrique mal dans le principe du tiers exclu, et se marie mal avec la logique formelle, sans pour autant (loin de là !), être incompatible avec elle.

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

*Les considérations qui précèdent conduisent naturellement à la pensée dialectique, que l'on peut définir comme le cadre général où s'inscrivent les phénomènes d'évolution. Ceux-ci font souvent intervenir plusieurs agents en interaction, c'est pourquoi on la désigne parfois par pensée du complexe. L'opposition de tendances (antagonisme) entre les agents impliqués y joue un*

*rôle important, au point que certains définissent la dialectique comme une théorie de la contradiction, que l'on doit comprendre au sens d'antagonisme et non pas d'impossibilité logique. De même, l'identité des contraires ou unité dialectique, terme déconcertant considéré parfois comme l'un des principes de la dialectique, doit être compris comme interdépendance ou causalité interactive*

*a-La contradiction, force créatrice.*

*b-Le passage du quantitatif au qualitatif (sauts, ruptures et émergence)*

*c-La négation de la négation : thèse, antithèse et synthèse (ou principe du développement en spirale)*

*d-Dans 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).*

*Historiquement, la dialectique est vieille et Platon en était l'un de ses plus prestigieux acteurs. Plus récemment, Hegel l'a développée et approfondie dans un cadre de pensée idéaliste<sup>4</sup>, alors que Marx a conduit ses recherches sur l'économie et la sociologie suivant une stratégie éminemment dialectique. C'est Engels qui, prenant modèle des recherches de Marx et s'apercevant de la grande généralité des méthodes mises en œuvre, qui se retrouvent dans bien d'autres situations, en a rendu explicite les lignes générales. Elles sont ainsi, de toute évidence, des émanations des sciences de la nature, à laquelle elles ne sauraient commander<sup>5</sup>.*

## **4.2. Le statut des sciences en trois figures et le cas spécial des mathématiques**

---

<sup>4</sup> La philosophie de Hegel est abstraite et hermétique pour le non initié. Pour Hegel, la contradiction fait partie de l'essence même de la réalité; les concepts sont contradictoires, puisque inséparables de leurs contraires. C'est cette contradiction interne qui engendre le développement historique et toute évolution.

<sup>5</sup> Cette interprétation de la dialectique (aux antipodes de tout dogmatisme) fait consensus à l'heure actuelle, aussi bien en France (Lucien Sève ...) qu'aux USA (Bertell Ollman...) ou en Allemagne (Robert Havemann...)

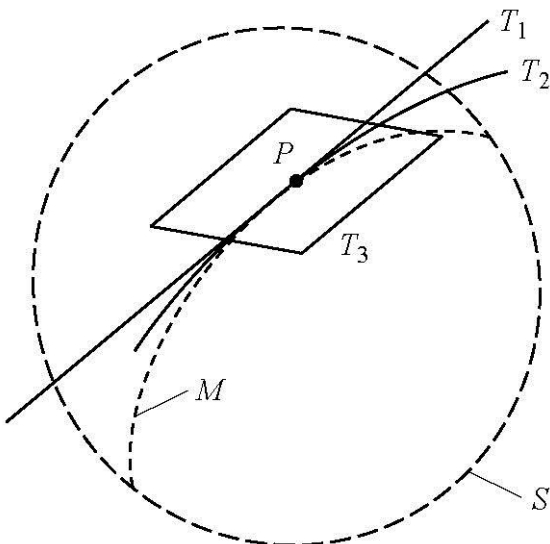


La connaissance scientifique jouit de trois propriétés qui nous semblent essentielles : elle est *approchée, intelligible et évolutive*. On peut décrire chacune de ces propriétés par une figure allégorique (Figs 3, 4, 5):

La science est approchée ( Figure 3):

On schématise le monde réel (compliqué et inconnu) par la surface  $S$  (en pointillé, puisque inconnue). Comme nous avons vu (Section 1.1, chapitre 1) à propos de la chute des corps, il y a des théories différentes pour divers types de phénomènes (pour la plupart d’entre eux il n’y a pas de théorie). Notons que les mathématiques ont un statut spécial, qui sera traité à la fin de cette section.

Les phénomènes d’un certain type (mettons par exemple les mouvements des corps solides) constituent une partie de  $S$ , la courbe  $M$  (elle-même inconnue). Si le point  $P$  désigne les corps au repos (mouvement de vitesse nulle), on peut, par exemple, utiliser la mécanique newtonienne  $T_1$  pour étudier  $M$ . Elle est «très simple» (une droite) mais donne des erreurs importantes dès qu’on s’éloigne de  $P$  le long de  $M$  (la mécanique newtonienne donne des erreurs d’autant plus grandes que les vitesses sont grandes). Une meilleure théorie pour étudier la même courbe  $M$  est la mécanique relativiste  $T_2$ ; elle est plus compliquée (on l’a représentée par une courbe), mais donne des résultats bien meilleurs que  $T_1$  lorsqu’on s’éloigne de  $P$  le long de  $M$ . Rien ne prouve qu’elle soit exacte; probablement, elle ne l’est pas, c’est-à-dire,  $T_2$  ne coïncide pas avec  $M$ . Il y a également des théories contenant la mécanique newtonienne du mouvement des corps comme un cas particulier. C’est le cas de la mécanique (newtonienne) des fluides, représentée par le plan  $T_3$ . Elle couvre un ensemble de situations bien plus grand, et contient  $T_1$  comme cas particulier, alors qu’elle ne contient pas  $T_2$  (elle n’est pas relativiste).



Fig\_3 --Symboles:  $S$  = Tous les phénomènes (inconnus),  $M$  = Corps solides en mouvement,  $P$  = Corps solides au repos,  $T_1$  = mécanique newtonienne des corps solides,  $T_2$  = mécanique relativiste des corps solides,  $T_3$  = mécanique newtonienne des fluides.

On peut noter que cette figure allégorique symbolise aussi les « niveaux d'abstraction ».

Il est clair que les éléments fondamentaux du schéma qui précède sont :

- *Le caractère partiel des domaines couverts par les théories scientifiques.*
- *Le caractère relativement simple des théories, de façon à pouvoir les maîtriser.*
- *Le caractère approché de la connaissance scientifique.*
- *La possibilité d'une multiplicité d'approches à un même problème.*

Une chose est claire : il n'y a pas et il n'y aura pas de science « exacte » ni une science globale (de tout). Ce serait un contresens ; une copie conforme du monde serait inutile puisque aussi compliquée que le monde ; aussi inutile que la Bibliothèque de Babel, la bibliothèque totale, décrite par J. L. Borges.

#### *La science est intelligible (Figure 4):*

Un élément fondamental de *la connaissance scientifique est le fait qu'elle est simple et compréhensible par les observateurs que nous sommes*. Cette propriété est fondamentale, et elle contient la relation entre le monde réel et celui de la pensée (la noosphère). On l'a symbolisé par la gravure de Kupka et Deloche de la première page de « L'homme et la Terre », œuvre posthume (1905) d'Elisée Reclus (1830-1905). Il convient de rappeler que cet ouvrage porte l'exergue *L'homme est la nature prenant conscience d'elle-même*, très belle formule qui contient le rapport dialectique entre le monde et nous, qui en faisons partie. On apprécie dans la figure que *la source de cette prise de conscience est le monde lui-même* et non pas une source extérieure. Ce point est très important, car il *exclut le relativisme comme non scientifique*.

*Fig-4* --Gravure de F. Kupka et E. P. Deloche pour la première page de « L'homme et la Terre », œuvre posthume (1905) d'Elisée Reclus (1830-1905).

La pensée profondément originale du géographe anarchiste Elisée Reclus éclaire les prémices des débats actuels sur la planète et l'environnement. Reclus et ses collaborateurs, Pierre Kropotkine et Léon Metchnikoff sont les inventeurs d'une interprétation solidariste du Darwinisme, *considérant l'émergence de la coopération entre les espèces comme un facteur fondamental de l'évolution*, contre les partisans de la lutte sans trêve et de la compétition entre espèces.



Elisée Reclus fût condamné à la déportation à vie en Nouvelle-Calédonie, le 15 Novembre 1871, à la suite de son engagement pour la commune de Paris. Sa renommée lui valût une pétition de soutien d'une centaine de scientifiques, dont

celui de Darwin. Sa peine fût, à la suite, commuée en dix années de banissement.

On pourra consulter en particulier l'article de Frederico Ferretti « Elisée Reclus : une philosophie de la nature » dans l'encyclopédie d'histoire numérique de l'Europe (Sorbonne Université<sup>6</sup>) :

### La science est évolutive (Figure 5):

---

<sup>6</sup> <https://ehne.fr/encyclopedie/thematiques/ecologies-et-environnements/identites-acteurs-et-pratiques-politiques/lisee-reclus-une-philosophie-de-la-nature>.

Une autre propriété fondamentale du caractère évolutif de la science est que les nouveaux éléments ne s'ajoutent pas simplement aux précédents, mais qu'ils les modifient et les restructurent. J'utilise pour cela des figures initialement développées (dans «Promenade dialectique dans les sciences») pour schématiser la démarche de la découverte scientifique d'après Hadamard, mais qui sont parfaitement utilisables dans le cadre présent d'évolution de la connaissance scientifique dans son ensemble.

On symbolise les connaissances scientifiques établies ou acquises à un moment donné par des petits disques. Ces disques ne sont pas complets, ils ont des entailles, symbolisant leurs imperfections. Ils sont reliés entre eux par des relations de causalité ou tout au moins de compatibilité, donnant une structure en triangles. Une découverte consiste à faire entrer un nouvel élément dans ce réseau structuré. Le processus de découverte comporte trois phases

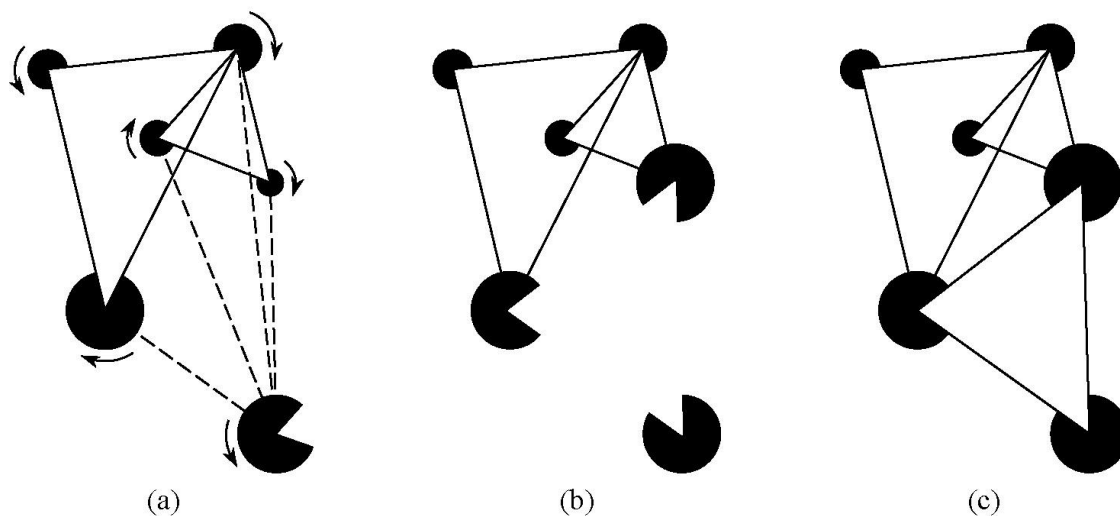


Fig-5 --Les étapes de la découverte scientifique : préparation, illumination (Eurêka) et vérification. Les connaissances initiales ont été modifiées par l'adjonction d'un nouvel élément.

*a- Préparation.*- Il y a un élément non relié à d'autres (qui sont structurés entre eux). Les lignes en pointillé sont des tentatives de liaison. L'élément nouveau, ainsi que les éléments préalablement connus et établis sont développés et modifiés (flèches de rotation) à la recherche d'une structuration possible contenant le nouvel élément.

*b- Illumination (Eurêka).*- La possibilité d'un nouveau triangle reliant l'élément isolé aux autres apparaît (pseudo-triangle de Kanizsa).

*c- Vérification.*- Le pseudo-triangle de Kanizsa (en cas de succès) devient triangle complet. Le nouveau triangle, qui était seulement imaginé en tant que possibilité dans la phase *b*, devient un vrai triangle. La « matière » du vrai triangle est constituée par les relations de causalité acceptées dans la science concernée; démonstrations en mathématiques, filiations possibles de l'évolution des organismes en paléontologie, ou tout autre. En cas d'insuccès, le pseudo-triangle de Kanizsa reste tel quel, on ne dit pas qu'il y a eu une découverte, mais simplement une *conjecture*. Il se peut aussi que lors des tentatives de construction du vrai triangle, il apparaisse son impossibilité logique, auquel cas on dira que la conjecture était fautive.

Les étapes *a* et *b* font largement place à l'*imagination* et à l'*analogie*, l'étape *c* à la *logique*.

Il convient de compléter cette section par une citation du biologiste François Jacob<sup>7</sup> :

*« Contrairement à ce que j'avais pu croire, la démarche scientifique ne consistait pas simplement à observer, à accumuler des données expérimentales et à en tirer une théorie. Elle commençait par l'invention d'un monde possible, ou d'un fragment de monde possible, pour la confronter, par l'expérimentation, au monde extérieur. C'était ce dialogue sans fin entre l'imagination et l'expérience qui permettait de se former une représentation toujours plus fine de ce qu'on appelle la réalité ».*

### **Le statut spécial des mathématiques.**

Les mathématiques pures présentent un caractère spécial dans les sciences. Elles ne concernent que les éléments les plus simples et épurés de la connaissance scientifique. Elles sont issues de la logique, elles sont, pour ainsi dire, le plus simple et dépouillé qui soit compatible avec l'intelligibilité (qui constitue, comme nous avons vu, l'une des propriétés essentielles de la science). Les mathématiques permettent d'obtenir des résultats extrêmement sûrs et précis à partir d'autres qui sont eux-mêmes extrêmement sûrs et précis (les mathématiques ne sont pas de la magie ; pour traiter n'importe quel problème, un mathématicien commence par donner des définitions extrêmement précises). Ce sont des *relations indiscutables et essentiellement intelligibles*. Les mathématiques ont donc un statut spécial dans la description qui vient d'être faite (symbolisée par la Fig 3). Leur domaine d'action se situe à l'intérieur des

---

<sup>7</sup> F. Jacob *La statue intérieure*, Paris, Odile Jacob 1997, p 250-251.

autres théories scientifiques, dont elles constituent l'ossature logique et indiscutable. Elles sont donc partout dans le schéma de la Fig 3. La logique et les mathématiques confèrent aux structures de la Fig 3 leur compatibilité avec la Fig 4 (l'intelligibilité). Elles sont aussi présentes dans la Fig 5, en particulier dans les relations de causalité et de compatibilité (ou de leurs tentatives)

On reviendra sur la rigueur en mathématiques et dans les sciences de la nature à la section 4. 5.

#### ***4.5. La rigueur en mathématiques et en sciences de la nature***

Les sciences sont certes rigoureuses, ou du moins tendent-elles à l'être. Mais il y a deux types de rigueur. La rigueur dans l'étude des modèles eux-mêmes est une rigueur de type mathématique ou logique. D'autre part, la rigueur dans l'articulation des théories (ou modèles) avec le monde réel consiste précisément en la prise de conscience de la différence entre le monde réel et les théories approchées que nous élaborons, de la primauté de premier par rapport aux théories, dont le devenir naturel est d'être perfectionnées ou remplacées, à la recherche d'une meilleure adéquation à la réalité.

### **Chap 5- L'apport des systèmes dynamiques à la dialectique**

#### ***5.2. Comment l'opposition de tendances engendre des oscillations***

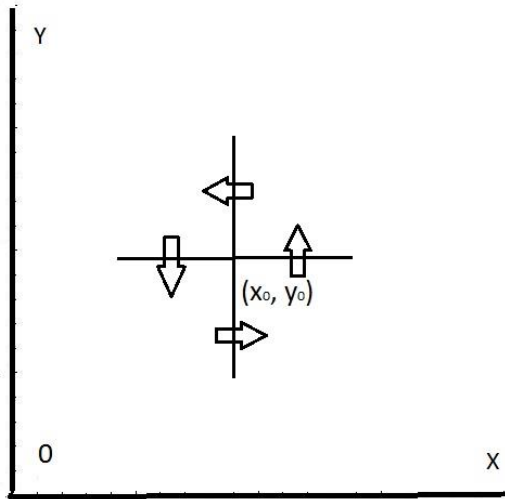
L'un des plus déconcertants et mal compris principes de la dialectique concerne *la puissance créatrice de la contradiction*, qui, comme nous avons déjà signalé doit être interprétée *au sens d'opposition des tendances* (et non pas d'impossibilité logique). Or, cela apparaît de façon patente en comparant les comportements des systèmes de type prédateur / proie avec des systèmes de type mutualisme (voire symbiose). Ces derniers relèvent de de la *symétrie* entre les deux agents en jeu, alors que le prédateur / proie relève justement de leur *dissymétrie*. En se reportant aux figures du chapitre 6, la différence est évidente entre celles des sections 6.1, 6.2, 6.3 (prédateur/ proie) et 6.4 (mutualisme). Alors que ces dernières conduisent directement à des équilibres entre les deux agents, les premières tournent autour (même si parfois arrivent à un équilibre

stable). La raison en est parfaitement et simplement expliquée à propos de la Fig 6 du chapitre 6 : lorsqu'il y a plus de proies qu'à l'équilibre, les prédateurs en profitent, ce qui augmente leur population ; à l'inverse, s'il y a plus de prédateurs qu'à l'équilibre, les proies sont plus consommées et leur population diminue. Les populations de prédateurs et les proies réagissent inversement aux fluctuations de l'autre population et cela donne une rotation autour de l'équilibre (qui peut se combiner avec d'autres effets).

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x} = a x (1 - (x/P)) - y \operatorname{Tanh}(e x) \\ \dot{y} = -cy + y \operatorname{Tanh}(e x) \end{cases}$$

pour des populations  $x$  de proies et  $z$  de prédateurs. Il s'agit du modèle de Lotka-Volterra avec deux modifications importantes : a) les proies seules  $x$  obéissent à une loi logistique avec une population d'équilibre  $P$  (Verhulst) au lieu d'une croissance exponentielle indéfinie (Malthus) et b) le terme de prédation (positif pour les prédateurs et négatif pour les proies) est proportionnel au produit  $x y$  (nombre statistique des rencontres) seulement pour  $x$  petit (proies rares) mais le nombre total de proies consommées par chaque prédateur a un plafond. On

a normalisé avec plafond égal à 1 et les unités de mesure des  $x$  et des  $y$  de façon à ce que le coefficient de prédation soit le même dans les deux équations



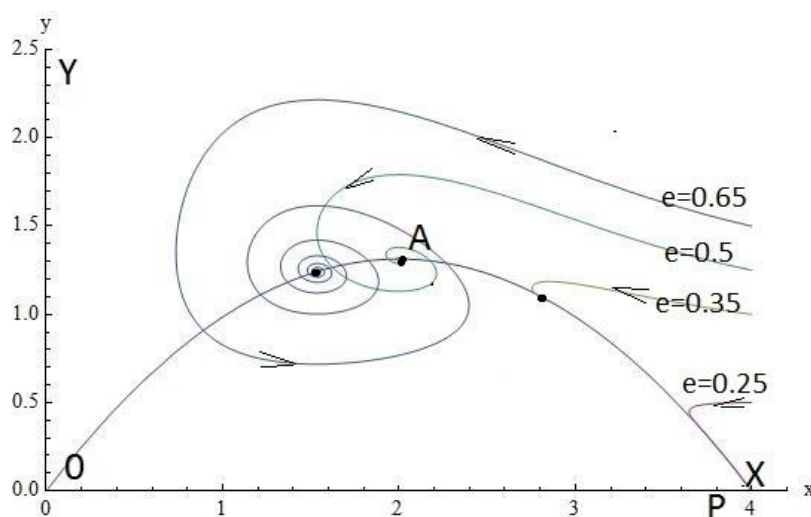
Fig\_6 —Le système prédation-proie. Les trajectoires traversent les droites horizontale et verticale passant par le point d'équilibre dans le sens des flèches.

Nous voyons donc que cette tendance à la rotation est inhérente à l'opposition des évolutions élémentaires des deux agents, qui engendre donc quelque chose d'autre qu'une convergence directe vers l'équilibre. Cet effet peut se combiner avec d'autres, mais il existe en principe, et est à l'origine de nombre de phénomènes d'oscillation et de propagation des ondes.

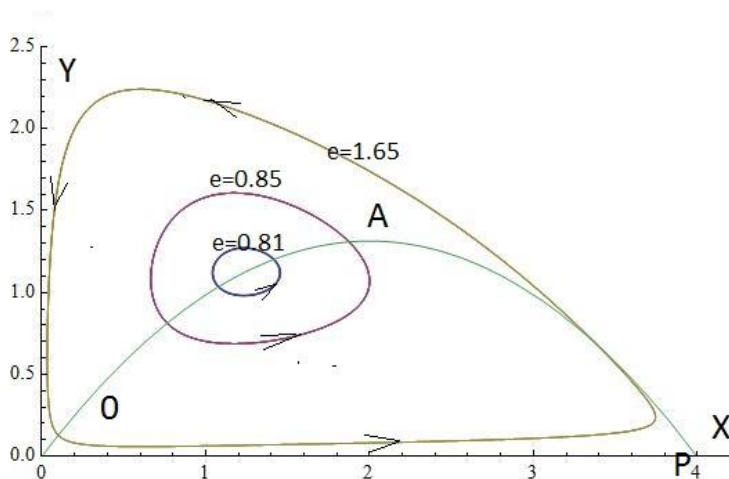


### 5.3. Sur l'efficacité des systèmes de prédation et les cycles hubris – némésis - résilience

Le système prédateur-proie et son comportement en fonction de l'efficacité (paramètre  $e$ ) du mécanisme de prédation est d'une richesse exceptionnelle. On doit se reporter au chapitre 6, dont nous commentons ici quelques éléments. L'évolution du point d'équilibre en fonction du paramètre  $e$ , semble assez naturelle, avec une première portion où la population des proies diminue et celle des prédateurs augmente lorsque  $e$  augmente, et une deuxième lorsque  $e$  est suffisamment grande, où l'augmentation de  $e$  entraîne la diminution des deux populations : une prédation excessive détruit le substrat même du mécanisme. Or, si l'efficacité est suffisamment élevée, le point d'équilibre devient instable, et l'attracteur est un cycle parcouru périodiquement, qui entoure le point d'équilibre. Autrement dit, *l'excès d'efficacité ne se termine pas par la disparition des proies (et ensuite des prédateurs), mais par un mouvement périodique autour de l'équilibre (qui est instable). Et le plus remarquable est la forme de ce cycle si l'on augmente encore  $e$ . Le cycle adopte une forme triangulaire où l'on peut identifier trois phases successives (H N R) : Hubris (essor des prédateurs au détriment des proies, qui arrivent à une quasi-disparition), Némésis (quasi-disparition des prédateurs suite à la rareté des proies) et Résilience (prolifération des proies résiduelles rendue possible par la rareté des prédateurs) qui ferme le cycle, toujours recommencé.*



Fig\_9 --Quatre orbites pour diverses valeurs de  $e$ . Elles tendent vers les équilibres (stables) correspondants, qui sont sur la parabole.



Fig\_10 Les cycles limites pour  $e=0.81$ ,  $e=0.85$ ,  $e=1.65$ . Lorsque  $e$  augmente, ils prennent une forme triangulaire

Il y a lieu de signaler que, pour des valeurs très élevées de l'efficacité  $e$ , lorsque le cycle HNR est parfaitement identifiable en tant que tel, il y a des régions dans le cycle où l'une des populations est très petite, ce qui peut remettre en question la validité du modèle. En effet, la modélisation relève des comportements moyens pour un certain nombre d'individus ; si ce nombre est très réduit (pensons à des populations de deux ou trois, voire un quart d'individu!) le modèle est simplement non valable. Il s'agit là d'une remarque très générale, valable pour toute modélisation, mais qui est très pertinente dans toute situation où il y a une petite population. Précisément, la résilience est d'autant plus intéressante qu'elle part d'une population petite. Les *épidémies* (les bactéries ou virus infectieux sont des prédateurs de leurs hôtes) *suivent des cycles probablement en rapport avec ce qui précède* ; parfois il y a des longs intervalles de latence (très petite population de prédateurs) dont la reprise n'est pas nécessairement périodique, car le modèle y est inapproprié.

#### **5.4. Ce que nous apprend le système de prédation – commensalisme. Quantité et qualité**

Commençons par décrire en quelques mots le système de prédation-commensalisme, qui est largement développé dans les chapitres 8 et 9. Il s'agit de l'évolution de deux populations de prédateurs et des proies (soumises aux interactions habituelles) où, en plus, les prédateurs exercent, une influence sur le substrat qui augmente la capacité de celui-ci pour nourrir les proies. Il est donc clair que les prédateurs exercent sur les proies deux actions, l'une préjudiciable (ils consomment les proies) et une autre bénéfique (ils augmentent la capacité du milieu). *Ces deux actions sont clairement de nature différente et non comparable* ; cela n'a pas de sens de les comparer ni de se demander laquelle est plus importante que l'autre.

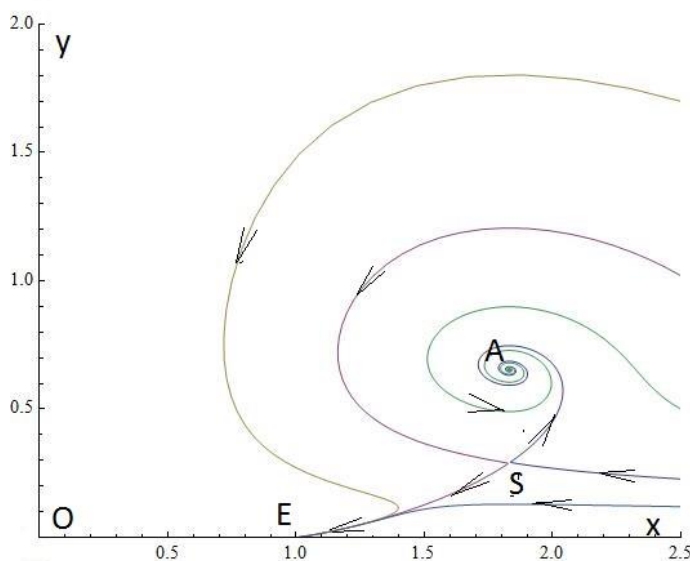
$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x} = a x (1 - (x/K)) - y \operatorname{Tanh}(e x) \\ \dot{y} = -cy + y \operatorname{Tanh}(e x) \end{cases}$$

Mais la capacité du milieu  $K$  n'est pas une constante, nous la prendrons dépendante linéairement de la population des prédateurs.

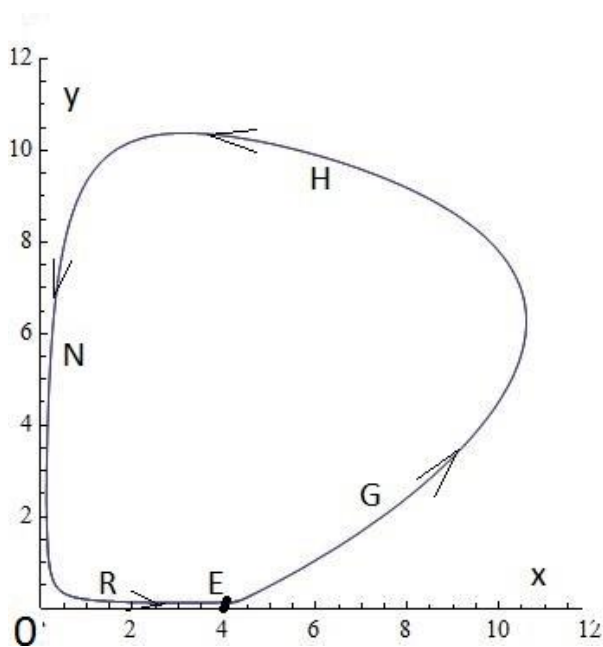
Ou de  $K = K_0 + \lambda y$  l'activité de prédation elle-même

$$K = K_0 + \lambda y h(x).$$

L'étude du comportement des solutions présente donc un grand intérêt épistémologique car il montre comment deux interactions (l'une donnant un avantage et l'autre un inconvénient démographiques) de nature différente, produisent des effets non comparables. Il s'agit de différences *qualitatives*, non comparables et non échangeables, qui conduisent à des situations nouvelles, en particulier (pour certaines valeurs des paramètres) une *bi-stabilité avec deux attracteurs*, le comportement final dépendant de la situation initiale. Cela conduit naturellement à l'analyse du passé, dont quelques éléments sont donnés dans les sections 8.2 et 8.3 (chapitre 8). Un des éléments les plus marquant de ce modèle est probablement la forme nouvelle prise par les cycles H N R lorsque l'efficacité de la prédation et l'effet du commensalisme sont suffisamment importants : *une nouvelle phase G* (Gloire, par allusion à la période des *Trente Glorieuses* de l'économie, à laquelle ce modèle s'applique, section 9.1 du chapitre 9), d'essor concomitant des proies et des prédateurs, si bien que *le cycle (périodique) devient G H N R*.



Fig\_24-- Portrait des phases pour  $\lambda = 5$  (les autres paramètres sont les mêmes). Il y a un nouvel attracteur A en plus de E. La variété stable du col S sépare les bassins d'attraction des deux attracteurs A et E.



Fig\_32 -- L'attracteur cyclique du système (1), (2), (3) avec  $a = 1$ ,  $b = 1$ ,  $e = 0.4$ ,  $\lambda = 3.5$ ,  $c = 0.85$ . On identifie les phases de Gloire, Hubris, Némésis, Résilience.  $E$  est l'équilibre des  $x$  seuls.

## 5.5. Sur l'économie

Les études sur l'économie ont joué un rôle central dans le développement historique de la méthode dialectique. Voici que les propriétés du système de prédation – commensalisme nous ont permis de construire un modèle allégorique global de l'économie capitaliste (section 9.1 du chapitre 9). Ce modèle est certainement trop grossier pour être d'une quelconque utilité pratique, mais il montre parfaitement le rôle du capital dans ses deux facettes: investissement permettant le développement économique et exploitation du travail salarié. Tout le monde veut avoir du travail, et tout le monde peste contre le travail ; voilà qui donne à réfléchir sur les avantages et inconvénients de nature différente. Naturellement, dans le cas de bi-stabilité, notre modèle pose le problème classique de l'accumulation primitive du capital (qui renvoie naturellement à la section 8.2 du chapitre 8). Le modèle permet également de

déduire une forme spéciale de la propriété classique en économie de la baisse tendancielle des taux de profit (section 9.3 du chapitre 9). Il s'agit là de toute évidence, de modèles mathématiques assez généraux pouvant éclairer des phénomènes réels de natures diverses.

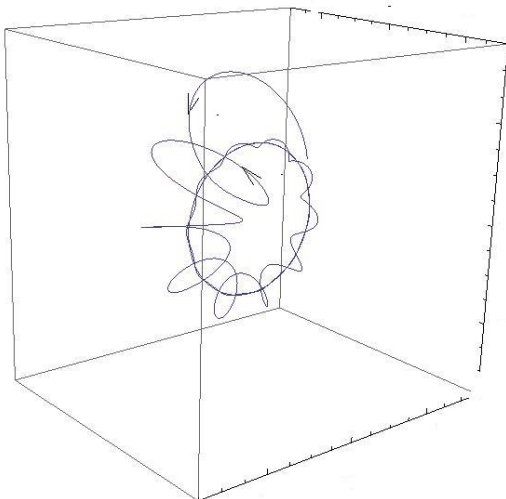
### **5.7. Les systèmes sans point d'équilibre**

Dans la vulgarisation scientifique, les descriptions usuelles des attracteurs cycliques sont souvent basées sur la description de systèmes avec un point d'équilibre dépendant d'un paramètre ; lorsque le paramètre dépasse une certaine valeur, le point d'équilibre (qui existe toujours) perd sa stabilité et c'est un mouvement périodique qui devient stable. On dit qu'il y a eu une bifurcation (celle qui correspond le mieux à ce type de phénomènes est celle de Poincaré – Andronov – Hopf). Les exemples abondent, tels que le mouvement en cellules de Bénard obtenu en chauffant par la partie inférieure un récipient contenant un liquide. Mais *il y a bien des systèmes ayant des mouvements périodiques parfaitement stables qui n'ont pas de point d'équilibre*. Cela ne change pas grand-chose au résultat, puisque les points d'équilibre instables ne jouent pas de rôle en tant qu'attracteurs. Cela signifie tout simplement qu'il y a d'autres schémas que le précédent. En fait, cela n'est possible (pour des raisons topologiques, théorème de l'indice en dimension deux) que dans des systèmes faisant intervenir au moins trois agents, ce qui fait que les exemples soient relativement rares.

La conséquence à retenir est que, *le fait qu'un système dynamique (en dimension au moins trois) n'ait pas de position d'équilibre n'implique nullement qu'il ne puisse avoir un attracteur*.

Un exemple remarquable est celui du système de deux espèces de prédateurs d'une espèce proie (sections 10.2 et 10.3 du chapitre 10). On démontre assez facilement qu'il n'y a pas de solution statique avec les trois populations non nulles. On a pensé longtemps que leur coexistence était impossible, ce qui constituait le Principe d'exclusion compétitive, reconnu de nos jours comme faux. *Il y a pourtant (dans certains intervalles des paramètres) un attracteur cyclique (évidemment stable)*. C'est l'un des exemples les plus remarquables des *capacités de coexistence des espèces dans des situations apparemment impossibles* : la coexistence (impossible dans un cadre statique) devient possible lorsque les paramètres (notamment l'efficacité des prédateurs) sont tels que

l'attracteur est dynamique. On peut expliquer le phénomène en réalisant que les cycles offrent bien plus de possibilités que les points pour compenser entre les diverses régions les avantages et inconvénients démographiques des deux prédateurs.



*Fig\_43 - Vue d'artiste montrant la convergence d'une orbite sur l'attracteur tridimensionnel.*

Par ailleurs, les systèmes sans point d'équilibre interne jouissent de propriétés de contamination par petites interactions (Section 10.7, chapitre 10) ce qui les rend assez répandus (et permet aussi de multiplier les exemples).

## **5.8. Stabilité versus optimisation**

Les problèmes de comparaison entre les modes de reproduction sexuée et asexuée est aussi d'un grand intérêt pour montrer comment *la stabilité (propriété fondamentale des attracteurs) est de nature essentiellement qualitative, et n'est pas nécessairement associée à une maximisation de la population.* En effet, le mécanisme de maintien de la population des mâles dans les exemples du chapitre 11 (avec les deux modes de reproduction en fonctionnement simultané) consiste simplement en le fait que les mâles produisent des mâles (par femelles interposées) en quantité suffisante pour que leur présence en tant que prédateurs soit possible (l'efficacité de leur prédation soit supérieure au seuil de viabilité de la prédation), ce que l'on peut obtenir par la polygamie, qui engendre la stabilité (pas la maximisation de la population) comme cela apparaît au chapitre 11.

Dans la plupart des situations, les modes de reproduction sexuée et asexuée ne sont pas en situation de compétition démographique permettant de les comparer ; on a des exemples des uns et des autres en des situations où ils sont manifestement stables. L'étude développée au chapitre 11 concerne l'une des rares situations où dans une espèce les deux modes de reproduction sont possibles, de façon continue ou intermittente, ce qui conduit, en fonction de l'intensité de la polygamie, à des situations diverses (des attracteurs) et non pas à l'optimisation de la population totale.

## **5.9. Les attracteurs cycliques ne relèvent pas de la minimisation d'une fonction d'état**

Les considérations qui précèdent nous conduisent naturellement à mentionner une propriété générale, extrêmement simple, des systèmes dynamiques avec un attracteur cyclique, qui a un grand intérêt méthodologique. *Le mouvement périodique le long d'un cycle ne peut dans aucun cas être conduit par la minimisation (ou maximisation) d'une fonction d'état (une fonction des variables  $x, y, \dots$  en jeu).* En effet, dans l'espace des variables  $x = (x_1, x_2 \dots x_n)$ , soit  $V=V(x)$  une fonction d'état. Si elle est strictement croissante le long des trajectoires, on aura partout  $V'(x) \cdot x' > 0$ . S'il y a un cycle périodique de période  $T$ , on aura sur les points du cycle  $\frac{dV}{dt} = V'(x) \cdot x' > 0$ , et en intégrant



de 0 à  $T$ ,  $V(T) - V(0) > 0$ , ce qui est impossible, puisque  $V$  revient au même point, donc à la même valeur.

*Cette propriété, qui est d'ailleurs évidente, exhibe une différence drastique entre les attracteurs ponctuels et cycliques. La stabilité d'un point d'équilibre est compatible avec la minimisation d'une fonction d'état (fonction de Liapounov; qui plus est, la stabilité se définit par l'existence d'une fonction de Liapounov, non unique, qui atteint son minimum au point d'équilibre). Par contre, les attracteurs cycliques sont incompatibles avec l'existence d'une fonction strictement croissante (ou décroissante) le long des orbites. Le plus qu'on puisse obtenir dans cette direction est que la fonction soit constante sur le cycle et y prenne sa valeur minimale (ou maximale). Mais le mouvement le long du cycle lui-même se fait alors à valeur constante de la fonction, et ne peut certainement pas être conduit par la tendance à la minimisation (ou maximisation).*

Cette propriété n'a rien de vraiment remarquable, puisque d'une façon générale, les systèmes dynamiques ne relèvent pas de la minimisation d'une fonction des variables d'état. Or, certains domaines de la physique, de la chimie, et même de la biologie ou de l'économie, sont conduits par une maximisation. Cela induit une tendance à vouloir tout expliquer par la maximisation d'une fonction, souvent très mal définie, voire pas définie du tout (telle que «le bien commun» en économie ou l'invocation de l'entropie en dehors de son domaine de définition). C'est pourquoi *il est très utile de bien avoir présent à l'esprit que dans tous les (nombreux) cas où il y a un cycle limite, le mouvement n'est certainement pas conduit par la maximisation d'une fonction des variables d'état.*

## **5.10. Couplage et synchronisation**

Il apparaît en général que, dès que les attracteurs sont dynamiques (cycles ou autres) la causalité des diverses propriétés prend des formes souvent inattendues, assez différentes de celles des attracteurs statiques (équilibres stables). Parmi les propriétés constructives des systèmes à attracteur cyclique (sans équivalent dans le cas statique) figurent les phénomènes de synchronisation. Il y a lieu de revenir sur la propriété très générale de *synchronisation entre deux systèmes faiblement couplés* (chapitre 12), qui a lieu dans tous les cas dans une fenêtre adéquate des valeurs des paramètres, pourvu que les fréquences des deux attracteurs soient proches. Il s'agit de l'un des phénomènes les plus remarquables des *capacités organisationnelles des systèmes dynamiques* : les deux sous-systèmes (par exemple écologiques) se

*mettent à osciller en même temps, indépendamment du fait que leur interaction soit (démographiquement) bénéfique ou préjudiciable pour l'un ou les deux sous-systèmes.*

### **5.12. La méthodologie dialectique a-t-elle des principes ou des outils ?**

L'un des plus fascinants de ces principes est celui de la puissance créatrice de l'antagonisme de tendances (énoncé souvent comme « force créatrice de la contradiction », ce qui est déroutant et imprécis). L'exemple le plus caractéristique est celui du système prédateur – proie, dont nous avons vu qu'il présente des facettes diverses suivant les valeurs des paramètres, conduisant à des attracteurs stables de nature diverse (disparition du prédateur, point d'équilibre, cycle périodique). Or, cette diversité est tout à fait naturelle dans des systèmes bien connus, tels qu'un vélo. Lorsqu'on ne sait pas monter à vélo, on l'essaie de façon statique, et on voit immédiatement qu'il s'agit d'un engin fortement instable, lourd, difficilement manipulable et doté d'une fâcheuse tendance à tomber, souvent du côté contraire à celui où on se trouve et avec la roue avant de travers. Mais, si l'on arrive à donner deux coups de pédale au lieu de vouloir s'arrêter, la machine prend un peu de vitesse et tout change : elle nous entraîne pratiquement sans pédaler. Ce qu'on a fait c'est de modifier le paramètre de vitesse de rotation des roues jusqu'à la région où la solution qui consiste à rouler à vitesse uniforme est stable. Et savoir monter à vélo consiste à savoir modifier les divers paramètres (position du guidon, des freins, position du cycliste sur sa machine...) en restant toujours dans les régions de stabilité. Mais parfois on sort de ces régions et on tombe (notamment lorsqu'on s'arrête). Et il est utile de savoir qu'avec le même vélo on peut faire une promenade ou une chute. Finalement, le système prédateur-proie est bien plus simple que le vélo!

Quant au principe *du développement en spirale* (thèse, antithèse et synthèse), il est simplement l'expression de l'efficacité de la méthode qui consiste à tenir compte des divers aspects et des interactions entre les agents en jeu, par rapport à l'analyse exhaustive des propriétés de chacun d'eux.

En ce qui concerne le chaos déterministe, c'est la prévisibilité qui devient de moins en moins précise (on peut penser à un effet cumulatif des erreurs, même petites, ce qui n'a rien d'étonnant). Le résultat est inattendu et sans doute digne d'approfondissement, et le mieux pour le comprendre est de revenir à un exemple comme celui du chapitre 13. *Mais les commentaires sur « la fin des certitudes » qui entourent souvent une mauvaise compréhension des phénomènes sont parfaitement injustifiés pour la simple raison que les certitudes n'ont jamais existé, même en absence de chaos, comme cela résulte clairement d'une saine interprétation de la connaissance scientifique, largement développée le long de ce livre. Ainsi, nous avons signalé à propos de la chute d'une feuille dans l'air (section 1.1, au chapitre 1) qu'il s'agissait là d'un mouvement combiné de la feuille et de l'air qui l'entoure, or, le mouvement des fluides est très souvent turbulent (chaotique) ; il en résulte que, en se promenant en automne dans un bois, on ne saura pas identifier une feuille trouvée par terre comme provenant d'un ou un autre des arbres environnants (supposés de la même espèce) car elles seront mélangées, sans que ce fait banal constitue une quelconque catastrophe pour la connaissance.*

*La dialectique n'est pas une science en tant que telle, mais une méthode d'étude des systèmes complexes en évolution, et ses principes sont une sorte de boîte à outils, à laquelle la théorie des systèmes dynamiques, confère une certaine ossature.*

