



HAL
open science

Épistémologie de la théorie de l'évolution : un outil pour développer le sens critique des enseignants et des élèves.

Fabienne Paulin, Eric Triquet

► To cite this version:

Fabienne Paulin, Eric Triquet. Épistémologie de la théorie de l'évolution : un outil pour développer le sens critique des enseignants et des élèves.. O. Perru, P. Lautesse, F. Charles. Une éducation à la pensée scientifique pour une société plus juste. Éducation, citoyenneté, pensée scientifique, VRIN, pp.99 - 123, 2018, 978-2-910425-46-3. hal-03916531

HAL Id: hal-03916531

<https://hal.science/hal-03916531>

Submitted on 30 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PAULIN F., & TRIQUET, É. (2018). Épistémologie de la théorie de l'évolution : un outil pour développer le sens critique des enseignants et des élèves. In : O. Perru, P. Lautesse, F. Charles (Dir.). *Une éducation à la pensée scientifique pour une société plus juste. Éducation, citoyenneté, pensée scientifique*. Paris : VRIN, pp. 99-123.

Depuis les années 2000, les connaissances et les compétences épistémologiques sont présentées comme un objectif de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre (SVT) dans les programmes français. Dans l'introduction commune pour le lycée il est en effet demandé aux enseignants «... de consacrer du temps pour faire comprendre ce qu'est le savoir scientifique, son mode de construction et son évolution au cours du temps ». Ainsi, le cours de sciences, lieu d'apprentissage des connaissances notionnelles, vise également à sensibiliser les élèves aux raisonnements et démarches scientifiques, en les insérant dans leur contexte historique. Cette double visée de l'institution scolaire rend incontournable la prise en compte par les enseignants des spécificités épistémologiques des sciences du vivant et des sciences de la Terre. Ces deux domaines disciplinaires sont envisagés, par plusieurs auteurs, comme étant en placés en tension entre d'une part les pratiques des sciences dites « historiques » – quand il s'agit de reconstituer l'histoire de la Terre et du vivant – et d'autre part celles des sciences « fonctionnalistes » – lorsqu'il importe d'expliquer les mécanismes en jeu – (Orange Ravachol, 2011 ; Gayon, 2004). Cette dualité épistémologique se trouve particulièrement représentée au sein des sciences de l'évolution, pilier central de l'enseignement des SVT, dont les objets d'étude, les « patterns » (les structures historiques du vivant) et les « process » (les mécanismes de l'évolution) mobilisent, selon les problèmes posés, les pratiques des sciences historiques et/ou celles des sciences fonctionnalistes (Lecointre, 2009 ; Pigliucci, 2013).

Dans le *Guide critique de l'évolution* qu'il a coordonné, Guillaume Lecointre (2009a, p. 69) pose la question suivante : « pourquoi l'évolution est-elle une théorie » ? Il interroge les raisons pour lesquelles la théorie darwinienne et ses prolongements constituent effectivement un cadre problématique pour les chercheurs. S'il en vient à poser cette question c'est que beaucoup lui refusent le statut de théorie scientifique. Ses détracteurs, comme les créationnistes, la qualifient de simple spéculation jamais mise à l'épreuve par l'expérience puisque selon eux elle serait non testable, donc non réfutable par les méthodes et outils des sciences expérimentales (Fortin, 2009). Dès lors elle ne pourrait prétendre au statut de théorie scientifique. La seconde objection formulée à l'encontre de la théorie de l'évolution affirme que l'on ne peut rien connaître de l'évolution passée dans la mesure où les chercheurs ne disposent d'aucun moyen technique leur permettant de remonter le temps pour aller constater par eux-mêmes des faits passés. Nous allons montrer que ces deux objections ne sont pas recevables et qu'elles relèvent plutôt d'une méconnaissance de la complexité épistémologique de cette théorie.

Cet article nous conduira donc à définir ce qu'est une théorie scientifique puis à interroger les types de démarches et la variété des modes d'explication en sciences. Au-delà, il s'agira de réexaminer les types de causalité rencontrés au niveau des sciences de l'évolution, et plus encore le statut des lois et la valeur de principes fondateurs comme celui de « sélection naturelle ». La dernière partie sera l'occasion de discuter de la place accordée ou non, dans l'enseignement de l'évolution, aux éléments épistémologiques développés ici. La théorie de l'évolution est en effet le seul cadre explicatif actuel qui rende compte scientifiquement du vivant tel qu'il est et tel qu'il a vraisemblablement été. À ce titre l'enseignement des sciences de la vie ne saurait faire l'impasse sur sa complexité épistémologique s'il se veut demeurer cohérent avec les objectifs d'apprentissage préconisés par les instructions officielles, notamment en terme d'éducation à la pensée scientifique. Nous tenterons ainsi de montrer combien la formation épistémologique des enseignants comme des élèves constitue la clé de voute d'une éducation scientifique qui place le sens critique et la raison au-dessus de toute idéologie.

L'objection de « la non réfutation par l'expérience »

Corine Fortin (2009) – dont la thèse de doctorat (en didactique des sciences) porte sur l'enseignement de l'évolution – rappelle que les preuves « matérielles » disponibles à l'époque où Darwin a posé les bases de son programme de recherche scientifique étaient essentiellement descriptives (fossiles, embryons, squelettes, etc.). Mais depuis le début du XX^{ème} siècle des preuves de nature expérimentale sont venues s'ajouter. Dès lors cette première objection n'a plus de sens. Dans le domaine des sciences de l'évolution, l'expérimentation a en effet été possible sur des organismes à temps de génération court, comme les bactéries ou encore les drosophiles¹. Dès les années 1920 les chercheurs sont ainsi parvenus à produire en laboratoire de nouvelles espèces par hybridation d'espèces différentes. En 1930, à partir de mouches drosophiles, L'Héritier et Teissier apportent même une approche statistique de l'évolution. Ces travaux en génétique des populations viennent conforter l'hypothèse de l'évolution par la « sélection naturelle ». Dans les années 1950, une expérimentation « grandeur nature » a pu être conduite sur la sélection naturelle via l'inoculation de la myxomatose à des populations de lapins introduits involontairement en Australie. Par la suite d'autres expérimentations vont mettre en évidence que la sélection naturelle n'est pas le seul mécanisme en cause : l'importance du « polymorphisme génétique » ou encore de la « dérive génétique » est progressivement démontrée.

La preuve expérimentale consiste à construire dans le monde réel des situations observables pour mettre à l'épreuve des hypothèses explicatives. Dans le domaine des sciences de l'évolution, il s'agit on le voit de modéliser expérimentalement des processus évolutifs telles qu'on peut se les représenter et d'en observer les résultats sur les populations, en milieu naturel ou au laboratoire. Les résultats de ces expériences expliquent les mécanismes de

¹ Par ailleurs, l'apparition de nouvelles espèces en milieu naturel a pu être plusieurs fois étudiée.

l'évolution et donc ceux de la phylogenèse (le déroulé du déploiement du vivant depuis son origine commune). Le régime de preuve est alors dit « hypothético-déductif ».

Pour Guillaume Lecointre (2009b), se trouvent concernées ici les sciences de l'évolution nommées « sciences des processus »². Elles tentent d'expliquer par l'expérimentation les mécanismes à l'œuvre dans l'évolution, ceux qui contribuent à la phylogénèse telle qu'elle s'est déroulée et se déroule encore.. Elles mettent en évidence des relations causales mobilisant un matérialisme méthodologique, et posent ainsi leur statut scientifique. Fortin (2009) a fait remarquer que Popper lui-même, jusque dans les années 1980, pensait que la théorie de l'évolution n'était pas une théorie scientifique, en raison, disait-il, de la difficulté à tester ou à réfuter la contingence historique par l'expérimentation. Mais au vu des apports des sciences de l'évolution, il a peu à peu reconsidéré sa position épistémologique. Dans son ouvrage *L'univers irrésolu* (1984)³ il concède que le darwinisme est « la meilleure explication » dont nous disposons pour expliquer l'évolution du vivant et qu'à ce jour il n'y a aucune hypothèse⁴ sérieuse qui peut rivaliser avec elle.

L'objection de la preuve historique comme preuve scientifique

Notons pour commencer que l'argument de l'impossibilité à reproduire l'évolution conduit à réfuter toutes les sciences historiques, ce qui est pour le moins problématique, et pas seulement d'un point de vue épistémologique. En fait cette seconde objection renvoie à une connaissance limitée des types de démarches – et des types de preuves associées – qui peuvent contribuer à fonder une théorie. Or, les démarches historiques tiennent toute leur place dans l'élaboration des théories, particulièrement en sciences de la vie. De ce point de vue le paléontologue S. J. Gould (1989) a pris soin de rappeler que la contingence historique n'est aucunement un obstacle à l'étude scientifique de l'évolution. Dans le même temps, comme le note Denise Orange Ravachol (2012), il souligne combien il est difficile de ramener les événements complexes et souvent uniques de l'évolution aux seules lois de la nature (Gould, 1989). Cela le conduit à penser que les sciences historiques utilisent « un mode différent d'explication, fondé sur la comparaison et l'observation d'abondantes données » (Gould, 1989, p. 279).

Ce mode de validation, nommé cohérentisme est mobilisé pleinement dans les (autres) sciences de l'évolution que sont les sciences dites des structures⁵ (en opposition celles des processus). Elles ne produisent pas des résultats expérimentaux à confronter à l'hypothèse comme les précédentes, mais recherchent sur le terrain (incluant les organismes) des traces de transformation du vivant. Il s'agit d'une investigation sur des indices factuels (anatomiques,

² Génétique moléculaire, embryologie, physiologie, génétique des populations, écologie, etc.

³ Karl Popper (1984). *L'univers irrésolu*, Hermann, p. 93.

⁴ Par hypothèse il faut entendre ici un cadre conceptuel pour comprendre la transformation et l'origine des espèces par des mécanismes biologiques exempts de finalisme.

⁵ Anatomie comparée, embryologie descriptive, paléontologie, systématique, phylogénie moléculaire, etc.

embryologiques, moléculaires etc.) et dans les archives fossiles⁶ qui relève de ce que Fortin (2009) appelle « une enquête critique ». Comme dans toutes les enquêtes, nous dit-elle, les indices sont éparés, et ce sont des opérations logiques (des inférences) qui les relient les uns aux autres. Il s'agit donc de faire parler le terrain : « repérer un indice, c'est donner un sens conjectural à une trace muette » (Stengers et Bensaude Vincent (2003, p. 195). La démarche s'apparente donc ici davantage à une démarche de terrain et le raisonnement associé est de type abductif : la mise en relation des indices permet de produire une conclusion cohérente par accumulation de données convergentes qui explique scientifiquement le phénomène étudié (Lecointre, 2009a).

La preuve historique, comme le rappelle S. L. Gould consiste ainsi à observer des faits actuels, à les mettre en cohérence, puis à déduire les conditions et événements du passé à l'origine de ces faits. Cela engage à reconstruire l'histoire non pas en descendant son cours mais en le remontant, autrement dit dans une logique rétrospective. Dans cet exercice de déduction à rebours du temps, ou rétro-diction, la mise en cohérence maximale des faits conduit, comme le rappelle Lecointre (2009a), à proposer une mise en ordre de ces conditions et événements (une proposition d'assemblage des pièces) sous la forme d'une série d'hypothèses connectées les unes aux autres. Ces hypothèses forment en substance ce qu'il appelle une micro-théorie. Si en histoire c'est le scénario historique qui tient ce rôle, en phylogénie (domaine d'étude de la parenté dans le monde vivant) il est dévolu à l'arbre phylogénétique⁷. Ici, nous dit-il, parmi plusieurs théories possibles – autrement dit plusieurs arbres possibles – on choisit celle dont la cohérence est maximale. On a donc reconstitué une histoire argumentée, vérifiable et révisable par des pairs.

Sciences nomologiques versus sciences palétiologiques

La théorie de l'évolution se nourrit donc de deux types de sciences : les sciences des processus et les sciences des structures. Les premières que l'on peut qualifier aussi de sciences fonctionnalistes s'intéressent aux causes proximales⁸ des phénomènes biologiques. Elles peuvent aussi être apparentées, comme on l'a vu, aux sciences biologiques de laboratoire puisqu'elles obligent à recourir au verdict expérimental. Les secondes, considérées cette fois comme des sciences historiques, prennent en compte les causes ultimes, évolutives ou historiques, des phénomènes biologiques, celles qui expliquent pourquoi un organisme est comme il est maintenant. Le passé est ici la clé du présent et le présent est le produit d'une

⁶ Au niveau des archives fossiles également, il existe ainsi des arguments en faveur de l'évolution. Citons à titre d'exemple la succession et la transformation dans le temps des espèces d'ammonites ou d'équidés dont l'explication la plus rationnelle est celle d'une continuité entre les espèces par filiation : les espèces dérivent les unes des autres.

⁷ Pour construire les arbres phylogénétiques, les degrés d'apparentement relatifs que traduisent les arbres sont le résultat d'un exercice de reconstruction à partir d'observations à expliquer. Cette figure rend compte de la manière la plus cohérente possible de « qui partage quoi avec qui ». De manière sous-jacente, c'est le principe de « descendance avec modifications » de Darwin qui transforme le partage d'attributs en degrés relatifs d'apparentement.

⁸ Mayr (1982) distingue deux types de causes : les causes proximales et les causes ultimes.

histoire⁹. Toutes deux sont des sciences empiriques et sont en relation avec les sciences de terrain : elles usent d'instruments leur permettant de se doter d'indices précieux pour la reconstitution de situations concrètes mais non de « représenter un phénomène comme une fonction munie de ses variables indépendantes ». Dès lors, pour Guillaume Lecointre (2009b), si on confond ces sciences et donc si on se trompe de régime de preuve, on arrive vite à des aberrations. C'est d'ailleurs un point crucial de l'enseignement de l'évolution dont les élèves demandent souvent et attendent des « preuves ». Il est alors indispensable d'expliquer que des régimes de preuve différents et/ou complémentaires sont présents au sein de la théorie mais que quoi qu'il en soit chacun est pleinement scientifique.

Cette bipartition entre sciences des processus et sciences des structures recoupe celle proposée à l'origine par Whewell (1840) – père de la philosophie de la biologie – en sciences nomologiques d'un côté et sciences palétiologiques de l'autre. Mais cette distinction n'est en fait pas l'apanage des seules sciences de l'évolution : ce sont toutes les sciences du vivant qui apparaissent concernées. En effet, dès l'origine, en proposant le terme de « biologie » pour désigner l'ensemble des sciences du vivant, Lamarck assigne à ce champ deux objectifs (Laurent, 1995) :

- la découverte des lois universelles qui rendent possibles la vie en tant que fait général ;
- l'inventaire de sa diversité et le récit de son histoire.

Whewell, pour sa part, voyait dans la biologie une authentique « science », c'est-à-dire une connaissance dégagant des relations constantes et universelles. Or la plupart des philosophes contemporains soutiennent la thèse inverse. De ce point de vue, les sciences de l'évolution n'échappent pas à ce grief, elles seraient même emblématiques de cette impossibilité de la biologie à proposer des lois. Nous nous proposons de discuter ce point plus loin, mais avant reconsidérons la première question de notre étude à la lumière des éléments nouvellement apportés.

La théorie de l'évolution : une théorie scientifique ? Un paradigme ?

Pour Corine Fortin (2009), au vu des résultats expérimentaux et de l'enquête critique, la théorie de l'évolution a fait ses preuves, d'une part parce qu'elle résiste aux faits (tout en réfutant la fixité des espèces), d'autre part parce qu'elle est en mesure de démontrer l'action des mécanismes biologiques dans la transformation des espèces. Ainsi, l'évolution apparaît comme une proposition scientifiquement établie, tant sur le plan biologique qu'historique.

Mais si la théorie de l'évolution est opératoire, elle est révisable à tout moment, pour tenir compte de nouvelles données, ce qui en l'occurrence est un critère important pour la distinguer d'un dogme et la définir comme théorie scientifique. De ce point de vue, ce n'est pas le type de preuve en jeu qui détermine la scientificité d'une proposition théorique. Celle-ci

⁹ Il s'agit ici d'une histoire structurale qui porte sur la phylogénèse : l'enquête historique vient impulser la modélisation sur les structures du vivant, puis valider celles ayant réussi.

tient plus à la possibilité de vérification par des scientifiques indépendants – via la reproduction d’expériences ou d’observations de terrain –, qu’au régime de preuve lui-même : expérimental ou historique.

Pour Guillaume Lecointre (2009a) promoteur de la classification phylogénétique à qui nous avons emprunté la question titre, il ne fait bien entendu aucun doute que la théorie de l’évolution est bien une théorie scientifique¹⁰. Mais comment définit-il la notion de « théorie » ? Il convoque deux auteurs dont les définitions se complètent :

- le philosophe André Lalande (1991) pour lequel une théorie scientifique est une large synthèse se proposant d’expliquer un grand nombre de faits ;
- l’épistémologue Robert Nadeau (1999) qui aborde la théorie comme un système intellectuel provisoire et révisable, utilisé comme moyen de coordonner, calculer, interpréter, comprendre, expliquer et prédire.

L’idée que la théorie de l’évolution constitue une vaste synthèse de travaux menés dans des champs aussi divers que la paléontologie, l’anatomie comparée, l’embryologie, la génétique ou encore la biologie moléculaire apparaît aujourd’hui évidente. Pour l’épistémologue Kuhn (1970) la théorie de l’évolution serait à considérer comme un paradigme au sens où elle correspond à des découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à un groupe de chercheurs des problèmes types et des solutions.

A l’issue d’un long développement dans lequel il discute du statut des sciences du vivant, Jean Gayon conclut que ces dernières trouvent leur unité dans une théorie de nature historique à savoir la théorie de l’évolution (Gayon, 1993, p. 53). L’hypothèse de la sélection naturelle rencontre selon lui une confirmation dans le grand nombre de déductions qu’elle autorise et dans son aptitude à articuler de nombreuses données en apparence hétérogènes de l’histoire naturelle (par exemple la diversité biogéographique, les phénomènes d’extinction, l’allure erratique de la classification ...). Pour Guillaume Lecointre, on l’a vu, c’est même la « maximisation de la cohérence des faits entre eux » qui garantit la pertinence et le pouvoir explicatif de cette théorie (1999a, p. 72).

Le point essentiel pour ce scientifique est que les observations de départ étant reproductibles, la preuve historique est donc reproductible par autrui. Par conséquent elle produit de la connaissance objective. Mais il ajoute que si les processus de l’évolution sont reproductibles et permettent de faire des prédictions, il n’en demeure pas moins que le produit de ces processus est hautement contingent puisqu’il a dépendu, dépend encore, et dépendra demain d’aléas historiques affectant les milieux. Et de préciser : « lorsque l’on dit que la phylogénie est prédictive, c’est qu’elle permet de prédire la présence d’états de caractères que l’on n’a pas encore observé sur des espèces actuelles ou de rétro-dire les caractères que devraient avoir

¹⁰ La question aurait gagné à être formulée sous la forme « en quoi – ou à quelles conditions – la théorie de l’évolution peut être considérée comme une théorie scientifique » ?

porté des ancêtres hypothétiques. En aucun cas il s'agit de prédire un futur évolutif » (Lecointre, 1999a, p. 77).

Mais si les processus de l'évolution sont effectivement reproductibles et si leur connaissance permet de faire des prédictions au sens où nous l'avons précisé, peut-on dire que c'est parce qu'ils suivent un certain nombre de lois ? Là encore il convient de préciser la nature de ces lois et leur spécificité. Car si on souhaite aborder la théorie de l'évolution comme une théorie scientifique au sens de Karl Popper (1902-1994), celle-ci doit pouvoir être assimilée à un système formé d'énoncés synthétiques universels ; c'est peut-être sur ce point que la théorie de l'évolution rencontre les objections les plus sérieuses.

Le problème de lois en biologie : des généralisations « accidentelles »

Si l'on tient pour vrai que « rien en biologie n'a de sens qu'à la lumière de l'évolution » et donc, comme le pense l'immense majorité des biologistes, que l'évolution est l'horizon ultime de toute généralisation dans les sciences du vivant (Gayon, 2004), on est enfin conduit à discuter la valeur des généralisations biologiques dans leur ensemble et avancer dès lors sur la seconde question formulée en titre. Or, comme le fait remarquer Jean Gayon, de nombreux philosophes contemporains de la biologie refusent le statut de lois à ces généralisations. On examinera de façon critique les arguments et limites de cette objection émanant cette fois de la sphère scientifique ce qui permettra (in fine) d'aborder la question des spécificités des sciences du vivant, et celle plus délicate de leur parenté avec les autres sciences de la nature. Selon une approche habituelle – classique devrions nous dire – la science est considérée comme la connaissance des lois de la nature. D'après les historiens des sciences cette notion de science est caractéristique de l'idéal de scientificité qui s'est mise en place dans les sciences astronomiques et physiques à la fin de la Renaissance. Kepler, Galilée, Fresnel, Newton ont laissé des lois qui portent leur nom. Les lois expriment ici des relations constantes et invariables et donc, dans cette approche, il ne saurait y de lois pour les entités possédant le statut de « choses singulières ». Si c'était le cas, on entrerait de fait en contradiction avec l'universalité exigée par la définition de la loi.

Pour Jean Gayon (1993), on ne peut nier que les biologistes parviennent à des généralisations tout à fait respectables et dotées d'un certain pouvoir de prédiction. Néanmoins, il souligne que les généralisations des sciences biologiques n'ont pas la rigidité des lois fonctionnelles des sciences physiques. Pour lui, la plupart des généralisations des sciences biologiques n'ont de sens que pour un objet singulier confiné dans une portion étroite de l'espace et du temps, et en particulier si l'on adopte une posture évolutionniste.

Il pointe ici deux problèmes :

- en premier lieu la variation intra spécifique (et synchronique) telle qu'elle s'exprime dans la nature rend illusoire toute entreprise visant à caractériser les espèces biologiques comme des objets homogènes et définissables ;

- en second lieu, l'idée même d'une évolution des espèces (variation intra spécifique diachronique) rend problématique le concept même de loi biologique.

Ainsi pour Jean Gayon, la catégorie philosophique « d'espèce » convient particulièrement mal aux « espèces biologiques », si l'on envisage celles-ci dans une perspective évolutionniste¹¹ (au sens d'une modification graduelle des espèces¹² avec divergence de celles-ci au cours des temps géologiques). En toutes circonstances, nous dit-il, le biologiste se heurte à la variation dans l'espèce, à la diversité des espèces, et en fin de compte à leur évolution : c'est pourquoi les généralisations les plus fascinantes sont pratiquement toujours confrontées à des exceptions¹³. C'est cela d'après lui qui fonde l'hypothèse philosophique selon laquelle les sciences biologiques ne peuvent jamais aller au-delà de « généralisations accidentelles ». En s'appuyant sur David Hull (1974)¹⁴, il concède qu'il est bien difficile de reconnaître en biologie d'authentiques lois déterministes. Ceci serait donc à relier au fait que les systèmes causaux auxquels s'intéressent les biologistes sont trop ouverts pour permettre la formulation de telles lois¹⁵. Et d'interroger la pertinence de les qualifier comme des lois.

Quels types de « lois » pour la biologie ?

Jean Gayon (1993), distingue deux sortes de généralisation pour les sciences de la vie : les lois causales faibles et les lois de développement. Intéressons-nous pour commencer aux premières.

Une loi causale diffère d'une loi fonctionnelle (classique en sciences physiques) en ce sens qu'elle implique une asymétrie temporelle : la cause précède l'effet¹⁶. Cela étant, une cause devrait être une condition nécessaire et suffisante. Mais, comme le fait remarquer Gayon, les sciences de la vie sont particulièrement éloignées de cette exigence si bien qu'elles doivent se contenter d'un concept affaibli de la cause (Ibid p. 42). David Hull (1974, cité par Gayon, 1993) fait remarquer que les explications causales des sciences biologiques pourraient se révéler compatibles avec l'idéal nomologique de la science, sous réserve d'adopter une interprétation épistémologique des relations causales « faibles » plus souples et plus précises, concevant la cause comme un ensemble de conditions suffisantes pour produire un effet, chaque condition étant nécessaire à l'intérieur de cet ensemble. Car là est le problème, dans les sciences de la vie les explications sont étroitement dépendantes d'un contexte et ce même au niveau génétique et moléculaire.

¹¹ Alors que le problème aurait été moindre dans une approche fixiste.

¹² Selon François Jacob (1981) il en va de même pour la machinerie moléculaire des vivants : mêmes caractères de diversité et de « bricolage » que tous les autres niveaux d'organisation.

¹³ Même l'ADN, on le sait aujourd'hui, n'est pas le seul support de l'information génétique et le code génétique n'est pas rigoureusement universel.

¹⁴ David Hull, *Philosophy of Biological Science*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974, Prentice-Hall; Chap. 3.

¹⁵ D'après Gayon (2004) le philosophe australien John Jamieson Carswell Smart fut sans doute le premier à affirmer sans ambiguïté, dès 1963 qu'il n'y a pas de lois en biologie.

¹⁶ Les lois fonctionnelles expriment des rapports indifférents à toute polarité temporelle.

Le second type de généralisation concerne « les lois de développement » très fréquentes dans les sciences de la vie. Elles consistent à dire que dans un certain système, des états A, B, C, D, etc. se succèdent de manière régulière. Mais toujours selon Gayon, le problème épistémologique de telles lois est qu'elles sont purement descriptives et qu'elles n'acquièrent jamais un statut d'énoncés déductibles de lois plus fondamentales. Là encore les aspects de diversité et d'évolution rendent selon lui passablement illusoire les velléités de déduire les lois de développement observées de quelque ensemble de lois fondamentales que ce soit. Et donc, comme déjà noté pour les « lois causales faibles », la pertinence des généralisations est toujours limitée dans les sciences biologiques par le constat qu'elles dépendent étroitement d'un « contexte ».

Pour conclure sur ce point, nous retiendrons que le biologiste¹⁷ se retrouve en définitive toujours devant la même situation épistémologique, qu'il s'agisse des lois causales ou des lois de développement. Si donc il n'y a pas de lois de l'évolution au sens habituel, peut-on au moins dégager quelques principes fondateurs ? Comme nous l'avons dit plus haut, c'est le principe de « sélection naturelle » qui constitue la clé de voûte de la théorie de l'évolution. Mais là encore les choses ne sont ni simples, ni évidentes. Ce principe, nous alerte Jean Gayon (1993 ; 2004), est un véritable défi pour l'épistémologue formé à des catégories destinées à éclairer la structure des grandes théories physiques. Dans celles-ci, rappelle-t-il, un principe est une assertion fondamentale dont la pertinence empirique est fondée sur les conséquences multiples et testables que ce principe, en conjonction avec d'autres, permet de déduire *a priori*. En conséquence, d'après lui, le principe de sélection naturelle n'est pas un principe, notamment parce que son action n'est concevable que localement¹⁸. La sélection dont il est ici question dépend en effet entièrement de la variabilité génétique et des conditions de milieu. Pour cet épistémologue, le principe de sélection naturelle est une sorte de « goulot d'étranglement de l'ensemble des causalités » qui interviennent dans l'évolution de l'espèce (hérédité, écologie et géographie, structure de la population, mode de reproduction, etc.). Il est fondamentalement un schème de causalité historique (Ibid., p. 55).

L'auteur conclut que dans la théorie de la « sélection naturelle » le principe fondamental n'est aucunement une « loi source¹⁹ » – mais au contraire a tous les caractères d'une « loi-conséquence²⁰ » – situation exactement inverse de celle des théories de physiques : la notion la plus centrale est celle dans laquelle s'accumule un maximum de causes locales. Il apparaît clairement que le modèle physique idéal de la loi est inopérant dans la mesure où on a affaire

¹⁷ Et paradoxe, quand il parvient à mettre au jour une généralisation spectaculaire comme le fait que chez tous les organismes, les vingt acides aminés entrant dans composition des protéines, sont toujours de structure Lévogyre, il ne sait pas l'expliquer !

¹⁸ Dans la mécanique de Newton, Lagrange et Laplace les principes valent en tout point de l'espace et du temps, indépendamment des conditions locales, fait remarquer Jean Gayon.

¹⁹ Les « lois sources » : elles décrivent la manière dont les forces agissent ; elles sont en petit nombre, et sont en général des axiomes qui valent pour les déductions que l'on peut effectuer à partir d'elles.

²⁰ Les « lois conséquences » : elles sont des conséquences déductibles des lois sources dans des conditions expérimentales spécifiées.

à des systèmes dont les règles sont le produit d'une histoire, avec ce que cela impose de localité et de contingence. Le principe de sélection naturelle est donc assimilé dans cette approche à un principe fondamentalement déterministe, qui permet des explications rétrodictives (à rebours).

Au-delà du problème lié à la singularité de objets étudiés par les sciences de l'évolution, apparaît dès lors un autre problème en rapport celui-ci avec la contingence des phénomènes étudiés. C'est par ce dernier aspect que nous achèverons cette étude.

Contingence et explications historiques

Dans son ouvrage *La vie est belle*, Stephen Jay Gould, fait remarquer qu'« on est obligé de regarder l'imposant spectacle de l'évolution de la vie comme un ensemble d'événements extraordinairement improbables, parfaitement logiques en rétrospectives et susceptibles d'être rigoureusement expliqués, mais impossibles à prédire et tout à fait non reproductibles (Gould, 1989, p. 10). Au moyen d'exemples célèbres il montre que du fait de la diversité des itinéraires les résultats finaux ne peuvent être prédits au départ. « Changez faiblement les événements initiaux, si faiblement que cela peut paraître sur le moment n'avoir qu'une minime importance, et l'évolution se déroulera selon une direction toute différente » (Ibid p. 57). Cette alternative ne représente selon lui ni plus ni moins que l'essence de l'histoire et elle se nomme « contingence » – et la contingence, précise-t-il, est une chose en soi, et non la combinaison du déterminisme et du hasard. Il apparaît clairement en évolution que la marque de l'histoire n'est pas seulement celle des phénomènes encore à l'œuvre de nos jours. Elle peut être celle d'événements, par définition singuliers dans le temps et dans l'espace, et dont la survenue tient de la contingence : ils auraient pu ne pas être.

De ces êtres naturels si variés, on a donc longtemps considéré avoue Jean Gayon (1993) « qu'il y avait « histoire » plutôt que science, autrement dit une connaissance descriptive et morcelée, dont l'unité pouvait être trouvée au mieux dans une activité de classification » (Ibid, p. 32). Comme Gould, Gayon reconnaît que les scientifiques ont souvent dénigré l'histoire (lorsqu'ils y ont été confrontés), considérant toute invocation de la contingence comme moins élégante et surtout moins signifiante que les explications basées directement sur des lois de la nature intemporelles. Mais une telle approche apparaît pour le moins réductrice et surtout, elle fait peu cas des spécificités des sciences de l'évolution.

Denise Orange Ravachol montre que la prise en compte de la dimension historique exige en fait de croiser « nécessité » et « contingence ». En effet, un même événement (E), qui aurait pu se produire, s'avère néanmoins condition *sine qua non* de l'événement (F) qui lui est postérieur. Il est donc contingent si l'on descend le temps et nécessaire si on le remonte. L'explication historique balaie ainsi le cours du temps, tantôt en repérant les possibles ouverts par l'événement et tantôt en remontant de l'événement à ceux qui l'ont rendu possible. En fait, les événements sont identifiés lorsqu'ils deviennent nécessaires pour rendre compte d'autres événements ou phénomènes. Il s'agit alors de rechercher leurs conditions de possibilité que

seule une logique rétrospective permet d'envisager. Pourquoi dès lors s'embarrasser de descendre le cours de l'histoire si ouverte en possibles s'interroge l'auteure, quand la remontée donne l'occasion d'une fermeture par la construction de nécessités ? Parce que, dit-elle, même si l'événement est contingent lorsqu'on descend l'histoire, même s'il ne peut pas être déduit d'une loi déterministe, nous ne pouvons pas admettre qu'il relève d'un hasard sans aucune règle (il n'est pas arbitraire, on ne peut pas envisager n'importe quel événement). Se met en place en fait un jeu de contraintes, externes et internes qui délimitent le champ des possibles et les retreignent sans pour autant les déterminer. C'est cet espace dans lequel des possibles peuvent être construits et reconstruits qui intéressent les scientifiques de ce domaine des sciences de la vie, comme d'ailleurs ceux qui s'inscrivent dans le champ des sciences de la Terre. Et rendre compréhensible cette tension entre contingence et contraintes fait à la fois tout le sel et toute la difficulté de l'enseignement de la théorie de l'évolution.

Conclusion épistémologique

Depuis Aristote, il est habituel d'opposer deux sortes de connaissances théoriques : d'une part, la science proprement dite (*episteme*), qui énonce des propriétés universelles, et les explique ; d'autre part, l'histoire qui renvoie à une connaissance par accumulation de faits d'observations, exempte de structure déductive forte. D'après cette ancienne distinction, l'histoire – étymologiquement l'« enquête » – est considérée comme une connaissance de second ordre, qui tendrait à s'imposer dans les domaines où l'universalité stricte est impossible, comme c'est le cas face à la diversité des minéraux, des plantes et des animaux. De son côté, Gould (1989) note la tendance chez les scientifiques contemporains à considérer les sciences historiques comme des « sciences molles » ou « simplement descriptives » par opposition aux « sciences dures » ou rigoureusement expérimentales auxquelles on rattache parfois abusivement les sciences physiques.

Nous avons tenté de montrer combien ces distinctions étaient simplistes et réductrices. L'approche historique se révèle en effet tout aussi capable de produire des savoirs apodictiques que l'approche fonctionnaliste, dans la mesure où elle s'intéresse moins aux solutions des problèmes qu'aux conditions de possibilités des événements qu'elle étudie. Pour Gayon (2004) c'est à un haut niveau d'abstraction, celui du principe de sélection naturelle – qui surplombe l'ensemble de la dynamique de l'histoire de la vie – que la biologie mérite son titre de science²¹. Il concède alors que si la biologie est assurément une science historique, c'est à ce niveau de structuration des connaissances qu'elle se révèle dans toute sa signification théorique (ibid. p. 11).

Qu'en est-il dès lors dans l'enseignement des sciences de la vie ? Deux questions apparaissent centrales : quelles pratiques et démarches d'enseignement sont préconisées par l'institution scolaire pour atteindre les objectifs épistémologiques prescrits et comment sont-

²¹ En lui conférant notamment un caractère nomologique.

elles mises en œuvre par les enseignants de SVT ? Elles ont guidé et structuré un travail de thèse (Paulin, 2015), sur lequel s'appuie cette dernière partie.

De l'enseignement de l'évolution

Les programmes des sciences de la vie et de la Terre (SVT) donnent une place conséquente à l'évolution dès le collège : classification du vivant dès la classe de sixième (fin du cycle 3), stabilité et diversité génétique des individus, mécanismes cellulaires et moléculaires de la reproduction et du maintien du patrimoine génétique, dynamique des populations, constat du renouvellement des espèces et mécanismes évolutifs (attendus du cycle 4)²².

Au lycée le programme se décline en trois thèmes qui se développent chacun de la seconde à la terminale. Le thème 1, intitulé « La Terre dans l'univers, la vie et l'évolution du vivant » reprend et approfondit les principales notions étudiées au collège en insistant en terminale sur les processus de diversification du vivant, la spéciation et l'adaptation des plantes à la vie fixée²³.

Rappelons également que l'évolution est inscrite dans les connaissances du socle commun de culture et de compétence²⁴.

S'il est toujours possible de discuter la pertinence des choix notionnels et leur progressivité, on ne peut nier la place importante accordée à l'évolution dans les programmes du secondaire français et qui fait presque l'unanimité dans le monde enseignant. Cependant, ces bonnes intentions et bonnes volontés ne suffisent pas à rendre accessible et surtout intelligible les savoirs sur l'évolution pour une majorité d'élèves. Les travaux des didacticiens convergent sur ce point : les obstacles sont nombreux et documentés et leur persistance tout au long de la scolarité interroge quiconque s'intéresse à la formation scientifique. (Clément, 2004 ; Coquidé, Tirard, 2009 ; Fortin, 2000 ; Quessada, 2008 ; Maurines, 2010)

Examinons ici quelques éléments d'explication en nous focalisant sur une piste peu explorée ou du moins peu exposée c'est-à-dire les difficultés liées à la nature scientifique de la théorie de l'évolution et à sa prise en charge dans son enseignement. On l'aura compris, à la lecture de ce qui précède, la théorie de l'évolution présente une réelle complexité épistémologique, parce qu'elle est souvent contre-intuitive pour un cerveau humain pétri d'intentionnalité et

²² MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, « Programme pour les cycles 2, 3, 4 », Bulletin officiel spécial, n° 11, 26 novembre 2015, p. 183-196, p. 339-351.

²³ MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, « Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de SVT-Classe terminale de la série scientifique », *Bulletin officiel spécial*, n°8, 13 octobre 2011.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, « Programme d'enseignement spécifique de sciences de la vie et de la Terre en classe de première de la série scientifique », *Bulletin officiel spécial*, n°9, 30 septembre 2010.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, « Programme de sciences de la vie et de la Terre en classe de seconde et technologique », *Bulletin officiel spécial*, n°4, 29 avril 2010.

²⁴ L'élève mobilise des connaissances sur : « les principales fonctions du corps humain, les caractéristiques et l'unité du monde vivant, l'évolution et la diversité des espèces. » Extrait du socle commun de connaissances, de compétences et de la culture. (Décret n° 2015-372 du 31-3-2015 - J.O. Du 2-4-2015).

d'un manque d'appétence pour la contingence et qu'elle nécessite de mobiliser un bagage conceptuel conséquent qui englobe toutes les échelles de temps et d'espace.

On comprend aisément que l'enseignement de l'évolution biologique soit exigeant (mais passionnant), non seulement en termes de transposition des savoirs, mais aussi de type de problèmes qu'il demande de résoudre. Il est également heuristique au regard des attendus institutionnels mis en avant dans les nouveaux programmes du collège : l'acquisition de connaissances épistémologiques et le développement de l'esprit critique.

L'enseignement de l'évolution permet en effet d'aborder des problèmes scientifiques qui mobilisent des arguments et des modes de validation différents et complémentaires. Comme nous l'avons présenté plus haut nous pouvons dire qu'il y a d'une part les problèmes concernant les mécanismes de l'évolution qui mobilisent les sciences fonctionnalistes et d'autre part les problèmes de type historique portant sur les événements passés ou les reconstitutions phylogénétiques qui mobilisent les sciences historiques ou idiographiques (les sciences des objets uniques).

Dès lors, que l'on s'intéresse aux problèmes de l'origine du vivant, de la disparition des dinosaures ou des mutations selon l'angle historique ou fonctionnaliste, les trois types d'inférence, abduction, induction et déduction sont mobilisables et donc susceptibles d'être enseignés. Il en est de même pour les modes de validation, démonstration expérimentale pour les sciences fonctionnalistes et consilience additive (ou accumulation de données convergentes) pour les sciences historiques, qui permettent de travailler le rapport au « vrai » ou plutôt au « vraisemblable » dans l'activité scientifique.

Ces bases épistémologiques nous semblent être des outils de réflexivité incontournables notamment dans la nécessaire distinction à apporter entre sciences/croyances/opinions, trois champs souvent confondus par les élèves du secondaire²⁵.

Au regard de ces enjeux d'apprentissage, nous avons questionné la prise en charge des aspects épistémologiques de l'évolution dans son enseignement. Une analyse épistémologique des programmes sur l'évolution²⁶ a été menée et a conduit au constat d'un déséquilibre descriptif et prescriptif entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques même si ces deux composantes épistémologiques sont citées dans les énoncés des programmes comme par exemple dans cette introduction commune aux trois années du lycée : « La science construit, à partir de méthodes d'argumentation rigoureuses fondées sur l'observation du monde, une explication cohérente de son état, de son fonctionnement et de son histoire. » Nous retrouvons

²⁵ La maîtrise de cette distinction est rappelé dans le projet d'ajustement et de clarification des programmes (14 juin 2018) « Au cours du cycle 4, il s'agit, en sciences de la vie et de la Terre, de permettre aux jeunes de se distancier d'une vision anthropocentrée du monde et de **distinguer faits et savoirs scientifiques des opinions et croyances**, pour entrer dans une relation scientifique avec les phénomènes naturels ou techniques, et le monde vivant » consultable en ligne :

http://cache.media.education.gouv.fr/file/CSP/87/2/Projet_ajustement_et_clarification_Programmes_de_sciences_C_2-3-4_14_juin_2018_VDEF_978872.pdf (page 33)

²⁶ Nous ne tenons pas compte ici des manuels scolaires qui ne sont pas des textes officiels.

là le double objectif des sciences du vivant et des sciences de la Terre : comprendre le monde tel qu'il est, tel qu'il a été et s'est transformé. Cependant quand il s'agit de définir plus finement les pratiques, les raisonnements et les modes de validation du champ scientifique des SVT, c'est l'épistémologie des sciences fonctionnalistes qui est majoritairement recensée avec une insistance particulière sur deux aspects : l'observation du réel et la validation expérimentale. La lecture des programmes donne alors l'impression que l'on « fait science » uniquement sur des objets observables et manipulables en laboratoire. Se trouvent ainsi exclus ou mis à la marge les objets d'étude des sciences historiques qui sont par nature des objets uniques (ayant existé une seule fois) et non isolables en laboratoire (par exemple, l'origine de la vie, la disparition des dinosaures ou la formation des Alpes). Et pourtant comprendre comment ces objets sont investis scientifiquement pour en reconstituer l'histoire fait tout autant partie d'une formation épistémologique et scientifique que savoir réaliser et interpréter des résultats d'une expérimentation en laboratoire. *In fine*, les résultats de l'analyse des textes programmatiques nous fait dire que l'épistémologie des sciences historiques est un « impensé » de l'enseignement des SVT ce qui est particulièrement problématique quand on place l'évolution au centre de l'enseignement des SVT. (Paulin, 2018). Ce « point aveugle » épistémologique explique selon nous certains malentendus que nous avons repérés dans l'enseignement de la phylogénie (l'étude de la parenté entre les êtres vivants) qui, en tant qu'elle se donne pour objectif la reconstitution de l'arbre du vivant, mobilise l'épistémologie des sciences historiques. La phylogénie est enseignée depuis la sixième jusqu'à la classe de terminale scientifique et c'est en classe de troisième et de seconde que la classification phylogénétique est replacée dans le cadre évolutif c'est-à-dire que les relations de parenté sont expliquées comme la conséquence de la « descendance avec modifications » qui caractérise la dynamique évolutive.

Nous avons analysé, à partir d'un corpus de fiches d'activités sur la phylogénie construite par des enseignants de SVT, l'épistémologie mise en œuvre pour enseigner cet objet des sciences historiques. Nous avons été quelque peu surpris de constater que les activités de construction d'arbre phylogénétique sont peu ou prou calquées sur une démarche de type fonctionnaliste au prix parfois d'une confusion des modes de validation (Paulin, 2018). En effet, dans ces activités l'arbre construit et retenu apparaît d'une part comme « vrai » (alors qu'il n'est que le plus vraisemblable possible au regard de la méthodologie utilisée) et d'autre part permettant parfois de justifier l'évolution. L'arbre devient ainsi une « preuve » de l'évolution ce qui est un contre-sens épistémologique puisqu'on ne peut construire un arbre de parenté que si le préalable de l'origine commune est posé avec comme conséquence directe que toutes les espèces sont apparentées. Ce cadre évolutif étant posé, la phylogénie « ne fait que » préciser les degrés d'apparentement. En aucun cas elle ne peut être une « preuve de l'évolution ». Nous avons là un exemple éclairant des conséquences problématiques de la méconnaissance des différents régimes de preuves dans l'enseignement de l'évolution.

Conclusion

Cette étude nous conforte dans la certitude qu'il n'y a pas d'enseignement possible des sciences de la vie sans une parfaite maîtrise de la nature épistémologique des objets scientifiques enseignés. C'est à ce prix seulement que cet enseignement sera véritablement un support pour la formation de l'esprit critique en permettant de travailler notamment le rapport au « vrai », la contingence historique et l'argumentation scientifique. De ce point de vue le thème de l'Évolution nous paraît présenter un très bon « potentiel épistémologique ».

Morange (2009) pointe plusieurs éléments favorables aujourd'hui à une réintégration de l'histoire évolutive dans la biologie fonctionnelle. Tout d'abord il note que de multiples transformations récentes de la biologie contribuent de manière convergente à donner une place croissante à l'histoire évolutive dans l'explication des fonctions biologiques. Dans le domaine de la biologie moléculaire qu'il connaît le mieux, les différences structurales et fonctionnelles trouvent sens dans l'histoire qui les a engendrées, fait-il remarquer. Cette diversité, pour lui, est le résultat de « ce » qui crée la vie, la rencontre de contraintes physico-chimiques et d'une histoire. L'important, selon lui, est qu'une description structurale et fonctionnelle conduise naturellement à un scénario évolutif, qui vient compléter l'explication physico-chimique et non, de toute évidence, la remplacer (Ibid., p. 310).

L'autre point important que nous souhaitons soulever dans cette conclusion est qu'il n'est nullement évident que l'historicité des sciences de la vie soit exceptionnelle dans les sciences de la nature. Au 19^e siècle pour Antoine Augustin Cournot, Mathématiques mises à part, tous les domaines de connaissance enveloppent un « élément historique » et « un élément théorique »²⁷. Pour Gayon (1993) cette situation pourrait bien en définitive être celle de toutes les sciences, y compris à certaines branches de la physique fondamentale comme la cosmologie, qui commence à s'intéresser aux singularités et aux schèmes de causalité historique. Pour Morange (2003 p. 169) la théorie darwinienne pourrait même servir de modèle à bien des sciences qui ont mis encore trop peu d'histoire dans l'explication des phénomènes dont elles s'occupent. Il s'agirait selon lui de remettre le temps à l'origine des relations fonctionnelles.

En fait, dans l'impossibilité de fonctionner comme des sciences nomologiques ordinaires, les sciences de la vie – au premier rang desquelles les sciences de l'évolution – nous obligent à élargir l'horizon des modes de raisonnement et de validation scientifiques, trop souvent réduits, dans le grand public et parfois dans l'enseignement, à la seule recherche de la preuve expérimentale.

Bibliographie

Clément, P. (2004), « Science et idéologie : exemples en didactique et épistémologie de la biologie » dans *actes du colloque Science – Médias – Société*, Lyon, ENS-LSH, p.53-69.4

²⁷ Antoine Augustin Cournot, *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*, Paris, Hachette, 1851. Cité par Jean Gayon, 2004, p. 3.

- Coquidé, M. & Tirard, S. (2009). *L'évolution du vivant: un enseignement à risque ?*. Paris : Vuibert : ADAPT-SNES.
- Fortin, C. (2000). Causalité et finalité – Les causes de l'évolution. In G. Rumelhard (Dir.), *Les formes de causalité dans les sciences de la vie et de la terre: approche didactique : représentation, conceptualisation, modélisation*, p. 81-101. Paris : Institut national de recherche pédagogique.
- Fortin, C. (2009). *L'évolution à l'école : créationnisme contre darwinisme ?* Armand Colin.
- Gould, S. J. (1989). *La vie est belle. Les surprises de l'évolution*. Points, Collection "Points sciences" (1998 trad.).
- Gayon, J. (1993). La biologie entre loi et histoire. *Philosophie*, 38, 30-57, édition de minuit.
- Gayon, J. (2004). *De la biologie comme science historique*. Sens public., http://sens-public.org/IMG/pdf/SensPublic_Jean_Gayon_Biologie.pdf
- Heams T., Huneman P, Lecointre G., & Silberstein M. (Dir.) (2009). *Les mondes darwiniens. Les sciences de l'évolution*. Syllepse.
- Jacob, F. (1981). *Le jeu des possibles*. Paris : Fayard.
- Kühn, T. S. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*. Champs Flammarion (1983, trad.).
- Lalande A. (1991). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Presses Universitaires de France.
- Laurent, G. (1995). La philosophie de Lamarck, *Bull. Hist. Epist. Sc. Vie*, 2 (1), 70-80.
- Lecointre, G. (2009a), (Dir.) *Guide critique de l'évolution*. Belin.
- Lecointre, G. (2009b). Récit de l'histoire de la vie ou De l'utilisation du récit. In: Heams T., Huneman P, Lecointre G., & Silberstein M. (Dir.) (2009). *Les mondes darwiniens. Les sciences de l'évolution*, p. 381-407. Syllepse.
- Maurines, L. (2010). *Sciences & religions quelles vérités? quel dialogue?*. Paris : Vuibert.
- Mayr, E. (1995). *Histoire de la biologie: diversité, évolution et hérédité. Tome 1*. Le livre de poche.
- Morange, M. (2003). Biologie : une causalité éclatée. In: Viennot L, Debru V. (Dir.). *Enquête sur le concept de causalité*, p. 161-177. Presses Universitaires de France, Collection "Science histoire et société".
- Nandau, R. (1999). *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*. Presses Universitaires de France.
- Morange, M. (2009). Darwinisme et biologie moléculaire. In: Heams T., Huneman P, Lecointre G., Silberstein M. (Dir.). *Les mondes darwiniens. Les sciences de l'évolution*, p. 305-316. Syllepse.

- Morange, M. (2012). *Contre la pensée unique en biologie*. La découverte, Collection "Poche".
- Orange Ravachol, D. (2012). *Didactique des sciences de la vie et de la terre: entre phénomènes et événements*. Presses universitaires de Rennes.
- Paulin, F. Charlat, S. & Triquet, E. (2018). Les sciences historiques : un impensé dans l'enseignement de l'évolution. *Recherche en éducation*, n°32.
- Pigliucci M. (2013). The Nature of evolutionary Biology : At the borderlands between historical and Experimental Science. In K. Kampourakis (dir.), *The philosophy of biology: a companion for educators*, New York : Springer, p. 87-100.
- Popper, K. (1984). *L'univers irrésolu*. Paris : Hermann.
- Quessada M.-F. (2008). *L'enseignement des origines d'Homo sapiens, hier et aujourd'hui, en France et ailleurs : programmes, manuels scolaires, conceptions des enseignants*. Université de Montpellier II, 2008, 430 pages. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00353971/fr/>
- Stengers I., & Bensaude-Vincent B. (2003). *100 mots pour commencer à penser les sciences*, Broché.
- Viennot L, & Debru V. (2003). *Enquête sur le concept de causalité*. Presses Universitaires de France, Collection "Science histoire et société".