

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/266417878>

La démarche scientifique dans les différentes disciplines

Article · April 2015

CITATIONS

0

READS

9,557

1 author:



Claude J Caussidier-Dechesne
Université de Montpellier

76 PUBLICATIONS 1,693 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



L'interdisciplinarité au lycée [View project](#)

La démarche scientifique dans les différentes disciplines

Claude Caussidier

LIRDEF (Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique, Education et Formation)

Sommaire

1- Introduction

2- La démarche scientifique dans l'histoire

- a- A l'origine de la démarche scientifique : l'amour de la raison
- b- La naissance de la démarche expérimentale et des sciences modernes : de l'amour de la raison à la primauté de l'expérience
- c- L'expérience scientifique et l'objectivité
- d- La démarche scientifique et la subjectivité du scientifique
- e- La démarche scientifique et le rôle de la société

3- La vision actuelle des caractéristiques de la "démarche scientifique"

4- Les objets et concepts des sciences "dures", similitudes et différences

- a- Les phénomènes étudiés
- b- Les conjectures et les hypothèses
- c- Les méthodes : démonstration et expérimentation
- d- Les lois
- e- Les théories et les modèles théoriques
- f- Le cas particulier des mathématiques

5- Conclusion : la démarche scientifique des scientifiques et la démarche scientifique en classe

6- Bibliographie

Ce document est écrit pour une grande partie à partir des textes fournis par les auteurs suivants et sont disponibles sur Claroline/IREM/Option Sciences:

Hélène Hagège (2007) La démarche scientifique: invariants et spécificités disciplinaires - une approche épistémologique.

Hélène Hagège (2007) La démarche scientifique en biologie.

Thomas Hausberger (2007) La "démarche scientifique" en mathématique.

François Henn (2007) La méthode scientifique en chimie.

Jacques Pelous et Ferial Terki (2007) Point de vue du physicien sur la démarche scientifique.

1- Introduction

Nous avons écrit ce texte pour tenter de répondre à trois questions :

- 1) Qu'est-ce qui est actuellement considéré par les spécialistes comme une "démarche scientifique" ?
- 2) Pourquoi l'apprentissage de la "démarche scientifique" sous la forme de "démarche d'investigation" fait-il partie des programmes scolaires actuels ?
- 3) Est-il justifié de considérer l'acquisition de la "démarche scientifique" et de la "démarche d'investigation" comme l'acquisition d'une compétence ?

Les sciences dites dures (mathématiques, physique, chimie, sciences de la vie, de la terre ou de l'univers) jouissent d'un statut privilégié dans nos sociétés occidentales. Elles produisent des connaissances auxquelles on accorde une valeur particulière. On pense qu'elles aboutissent à une représentation vraie du monde. D'où vient cette particularité ? En quoi ces connaissances sont-elles différentes des autres connaissances issues de l'activité humaine (sciences humaines, religions...) ?

Tout d'abord, ces sciences sont caractérisées par la mise en œuvre d'une démarche particulière, "la démarche scientifique". Selon l'image populaire, une telle démarche aurait pour but de découvrir, de comprendre et d'expliquer le monde tel qu'il est. Elle serait constituée d'étapes bien déterminées, respectées de manière rigoureuse. Elle consisterait en l'exercice d'une raison pure, la confrontation avec des expériences et des observations neutres, qui conduiraient à l'élaboration de théories en stricte correspondance avec la réalité. Ainsi, les connaissances objectives qui en émanent s'ajouteraient progressivement de manière à tendre asymptotiquement vers la vérité, c'est à dire une description du monde tel qu'il est. En effet, même si l'histoire nous a montré que la science avance parfois par tâtonnement, les erreurs seraient éliminées au fur et à mesure, de telle manière que les connaissances conservées au bout du compte répondraient à ce cheminement.

On constate que les programmes scolaires actuels privilégient de plus en plus l'acquisition de compétences à celle des connaissances. En ce qui concerne les matières scientifiques, on se demande donc comment mieux articuler connaissances et compétences (Romainville, 2006) ? Enseigner la "démarche scientifique" serait-il un moyen qui permettrait de répondre à cette difficulté ?

Notre objectif est ici est de tenter de définir la démarche scientifique, d'examiner les objets et concepts qu'elle met en jeu dans les différentes disciplines scientifiques, et de mettre en évidence ses caractéristiques communes aux différentes sciences.

2- La démarche scientifique dans l'histoire

Afin de comprendre comment s'est constituée une démarche particulière aux sciences, il est utile d'analyser comment elle s'est élaborée au cours de l'histoire.

a- A l'origine de la démarche scientifique : l'amour de la raison

La naissance de l'activité scientifique a eu lieu en Grèce, au 6ème siècle avant notre ère, bien qu'en pratique les mathématiques soient nées bien avant, avec les échanges commerciaux et les nécessités coïncidentes de dénombrer des objets et de calculer des surfaces cultivables¹. Les mathématiques étaient alors des outils permettant de résoudre des problèmes pragmatiques. Ce sont les grecs qui ont posé les premiers fondements solides des mathématiques, qui en ont fait une véritable discipline théorique, avec des énoncés généraux plutôt que relatifs à tel ou tel cas particulier. Ils leur ont donné des caractéristiques qui sont encore utilisées de nos jours.

Chez les grecs, un rôle primordial est accordé à la raison, à laquelle Aristote (384-322 avant JC) tente d'assigner des règles intangibles. La progression et la démarche scientifiques comprennent aussi la désignation d'objets légitimes d'études (ex : la physique aristotélicienne) et l'invention de termes spécifiques, et donc un enrichissement du langage pour les désigner. Le langage intervient d'ailleurs de façon prépondérante car l'argumentation et la persuasion des autres scientifiques sont essentielles dans la progression scientifique. Dans ce but, une forme de discours la "logique aristotélicienne", système de logique formelle, est élaborée². Enfin, la tentative d'établissement d'une "démarche scientifique" est indissociable du projet humain qui la sous-tend qui est de généraliser les explications et d'abstraire d'une diversité apparente une unité de fonctionnement sous-jacente.

b- La naissance de la démarche expérimentale et des sciences modernes : de l'amour de la raison à la primauté de l'expérience

Pendant le moyen-âge, la scolastique, mouvement philosophique et théologique, est enseignée dans les écoles et universités européennes (Durkheim, 1938), son but ultime est d'intégrer en un système ordonné la sagesse naturelle de l'antiquité gréco-romaine et la foi chrétienne. Les scolastiques se conformaient étroitement aux exigences de la démonstration scientifique telles que les avait définies Aristote mais, loin d'essayer de produire des œuvres originales, ils se contentaient d'étudier et de citer les auteurs anciens. Pour étudier un texte, on étudiait plutôt le commentaire qu'avait composé sur ce texte une autorité reconnue, qu'on enrichissait ensuite de son propre commentaire et de ses réflexions personnelles, quitte à tenter de démontrer que le commentateur précédent s'était trompé au niveau de l'interprétation du texte original.

A la Renaissance, un élan de retour à la nature exalte la société. On comprend alors que la raison n'a de valeur scientifique que si elle est confrontée à l'expérience et deux hommes,

¹ "Calcul" vient du latin calculus, "caillou" ; à l'origine, les bergers avaient un pot à l'entrée de la bergerie où ils jetaient autant de cailloux que de moutons qui sortaient afin de vérifier leur nombre au moment où ils rentraient au bercail. On a trouvé récemment au Congo, deux fragments osseux datant de 20 000 ans et portant des séries d'encoches qui pourraient constituer le plus ancien système mathématique.

² Au 20^{ème} siècle, G. Boole, A. de Morgan et surtout G. Frege unirent logique et mathématiques. Gottlob Frege (1848-1925) conçut un langage formalisé qu'il appela "l'écriture du concept" et qui permettait de vérifier un raisonnement comme on vérifie un calcul. Aujourd'hui la logique explore les multiples facettes du raisonnement (Pour la Science, 2005).

F. Bacon et Galilée, vont établir cette nouveauté dans la démarche scientifique.

Francis Bacon (1561-1626) va introduire une nouvelle conception de la science et des rapports entre l'homme et la connaissance. Il veut créer une science qui prennent ses distances d'avec les scholastiques et dont l'objet sera une connaissance utile "capable de doter la vie de l'homme d'un nombre infini de possibilités". Bacon a une démarche inductiviste basée sur le classement d'événements et qui tente d'ordonner le monde avant de chercher à en comprendre les lois. Cependant Bacon n'a pas compris le mécanisme de la méthode expérimentale et malgré son rôle historique important dans l'histoire des idées, son œuvre scientifique n'a pas été à la hauteur de ses théories et c'est Galilée qui va bouleverser la démarche scientifique dans les faits.

Galileo Galilei (1564-1642) est mathématicien et physicien. Précédemment, la scolastique imposait une vision du monde qui confortait les sens : comme on le voit tous les jours, le soleil tourne autour de la terre – il se couche le soir – et les étoiles sont fixes dans le ciel, accrochées au dôme céleste. Galilée étudie la cycloïde et formule les lois de la chute des corps, montrant que la trajectoire d'un projectile est une parabole. Il réalise l'un des premiers microscopes et effectue les premières observations du ciel à la lunette. Il soumet ses hypothèses au verdict de l'expérience et les choisit selon leur capacité à prédire (et non pas selon l'évidence). Il introduit notamment la notion de pesanteur et le concept de vitesse instantanée pour expliquer la chute des corps pesants. Son originalité est de substituer aux considérations qualitatives de ses prédécesseurs des concepts clairs, univoques – position, inertie, vitesse instantanée, accélération, puis de confronter les résultats au raisonnement, explicité sous forme mathématique et à des données expérimentales bien définies, et non à des prétendues évidences logiques.

Galilée est considéré comme l'inventeur des sciences modernes. Celles-ci prennent de nouvelles caractéristiques. Elles sont en opposition avec le sens commun et proposent de nouvelles valeurs de référence : ce ne sont plus la cohérence des théories avec l'immédiateté de nos sens, ni la cohérence interne aux théories, mais une cohérence entre théories, observations, et prédictions, validée par les applications mathématiques. On assiste à un élan caractéristique du projet sous-tendant la démarche scientifique : se détacher de la subjectivité humaine pour aspirer à une objectivité, c'est-à-dire à l'énonciation de discours qui auraient une valeur indépendamment de notre condition humaine et pourraient représenter des propriétés intrinsèques aux objets – la réalité telle qu'elle est.

Une autre nouveauté instaurée par Galilée et qui signe l'avènement de la démarche expérimentale est la création d'instruments au service de la théorie, permettant de confirmer ou d'infirmer des prédictions issues de la théorie. Ainsi, ce qui apparaît central dans la démarche scientifique n'est plus la raison seule, mais la relation entre ses produits (les théories) et l'observation du monde (issue de l'expérimentation).

Notons que la précision d'une démarche scientifique s'accompagne d'un enrichissement du langage et de l'invention d'objets d'études abstraits, les concepts, que l'on peut considérer comme des outils. Ces objets ne sont pas donnés par la nature, mais inventés pour répondre à des besoins. Enfin, la naissance de cette nouvelle méthode instrumentalise les mathématiques, qui deviennent outils pour d'autres champs de la science.

Les changements consécutifs aux travaux de Galilée et intervenant au 17^{ème} siècle sont appelés "la révolution scientifique". Cette révolution annonce une transformation des modes de travail des scientifiques (notamment concernant la divulgation des travaux). A partir de la deuxième

moitié du 17^{ème} siècle, les premières académies et sociétés scientifiques sont créées (par exemple: la Royal Society de Londres en 1660 et l'Académie des Sciences Françaises en 1666). Les scientifiques vont se spécialiser de plus en plus dans l'étude de domaines particuliers du monde en précisant leur démarche et en délimitant les objets d'étude auxquels une démarche donnée s'applique.

c- L'expérience scientifique et l'objectivité

Au 19^{ème} siècle, deux français tentent de formaliser la démarche scientifique, A. Comte et C. Bernard.

Le philosophe français Auguste Comte (1798-1857) reprend certaines idées de Bacon sur l'antériorité des observations sur la connaissance. Il est le propagateur du mouvement appelé positivisme. Il entre en rupture avec les thèses de C. Bernard, en soutenant qu'il faut rechercher des lois et non des causes en se basant sur l'évaluation de quantités et non de qualités. La distinction entre lois et causes est que les premières répondent à un "comment", tandis que les secondes répondent à un "pourquoi". Ainsi, il est idéaliste et non réaliste. Il prône la méthode inductiviste : les théories ne doivent pas se faire a priori ; on doit seulement interpréter a posteriori.

Claude Bernard (1813-1878), médecin et physiologiste français, est considéré comme le fondateur de la physiologie moderne. Sa physiologie expérimentale entre en rupture avec la médecine de son époque qui était avant tout descriptive. Il reste pour beaucoup de naturaliste celui qui a formalisé la démarche expérimentale en biologie en six étapes (le fameux "OHERIC")¹. Ses idées reposent sur une interprétation déterministe (déterminisme d'ailleurs dominant au 19^{ème} siècle, siècle de la pensée mécaniste) telle que chaque phénomène trouve son origine dans un ensemble fini de causes. En isolant toutes les causes, le phénomène doit être entièrement accessible à la raison. Cette démarche scientifique constitue un schéma idéal que même C. Bernard n'a pas appliqué puisqu'il a avoué avoir privilégié sa théorie à des faits en certaines circonstances, ce faisant il affirme la primauté de l'idée sur le fait, seul moyen de construire un système explicatif rationnel.

d- La démarche scientifique et la subjectivité du scientifique

En étudiant l'histoire des sciences, **Gaston Bachelard** (1884-1962) réalise, en quelque sorte, la psychanalyse de la connaissance et définit un nouveau concept : la notion d'obstacle épistémologique. Ces obstacles épistémologiques sont des notions enracinées dans la subjectivité du scientifique. Selon Bachelard (1971), tant qu'ils ne sont pas pris en compte on reste dans un esprit préscientifique. Il existe plusieurs types d'obstacles :

- Des obstacles dus à l'imagination. Dans sa lecture des faits, le scientifique utilise des images familières qui ne s'appliquent pas aux faits scientifiques (ex: Descartes décrit le cerveau comme une éponge ; et actuellement, on représente l'atome sous une forme planétaire).
- Des obstacles dus à l'abstraction. Le scientifique généralise de façon abusive les connaissances

¹ OHERIC: 1) Observation sans préjugé ; 2) élaboration d'une Hypothèse réaliste, fondée et vérifiable ; 3) Expérience avec un témoin et une contre-épreuve ; 4) le Résultat produit un fait qui devient l'arbitre suprême des théories : elles sont rectifiées en fonction, et de manière à avoir des théories les plus générales possibles. Ainsi, 5) l'Interprétation conduit à 6) la Conclusion "qui s'impose".

acquises sans déterminer les limites adéquates à leur usage.

- Des obstacles liés à la finalité envisagée. Les phénomènes scientifiques sont interprétés comme ayant des buts utilitaires.
- Des obstacles substantialistes. Le concept scientifique est reconstruit et réifié (transformé en chose, ex: le gène).
- Des obstacles animistes. Cet obstacle consiste à étendre à de nombreux domaines l'intuition d'un principe de vie, c'est l'expression d'une philosophie vitaliste de l'univers (ex: électricité).

Outre le concept d'obstacle épistémologique, Bachelard avance d'autres concepts fondamentaux qui vont changer la conception de l'activité scientifique:

- celui de coupure épistémologique, rupture méthodologique, changement de concepts et de méthodes à l'intérieur d'une science ;
- celui de psychanalyse de l'esprit scientifique, recherche et détection des valeurs et projections inconscientes entravant le savoir ;
- celui de "rationalisme appliqué", conçu comme centre actif où s'échangent les vérités de la raison et les vérités d'expérience : la raison se construit en dialoguant avec l'expérience et en s'appliquant à elle.

e- La démarche scientifique et le rôle de la société

Karl Popper (1902-1994) montre que l'induction prônée par A. Comte n'est pas une pratique heuristique¹ et que, non seulement elle n'est pas mise en pratique par les scientifiques, mais qu'elle ne pourrait pas l'être. Il propose qu'une loi est une construction intellectuelle et en cela n'est donc pas objective. Seule la réfutation est objective. Il propose ainsi le critère de scientificité, autrement appelé critère de démarcation entre science et pseudoscience, comme étant la réfutabilité (et non la vérification comme une signification). Ainsi, pour Popper (1994), une assertion non réfutable ne peut être scientifique car la réfutabilité constitue un critère d'objectivité ; et la réfutabilité est celle de l'expérience. Pour Popper, est scientifique ce qui est empiriquement réfutable. Ainsi, une vérité scientifique est une assertion qui, bien qu'empiriquement réfutable, n'est pas (pas encore) réfutée par l'expérience. Une vérité scientifique ne peut donc être prouvée, elle ne peut que résister aux tentatives de falsifications expérimentales et elle garde un caractère irréductiblement "provisoire". En conséquence, il n'existerait pas de connaissance ultime, puisque celle-ci devrait être réfutable. On pourrait comprendre que, si l'on suit le critère de réfutabilité de Popper, les mathématiques sont un système théorique non scientifique car non réfutable expérimentalement. Lakatos (voir *infra*) viendra éclairer la pensée de Popper. Selon Lakatos (1977), l'exposition de la démonstration formelle ne reflète pas l'approche qui y a conduit, celle-ci consistant à partir d'énoncés dont on précise par la suite le domaine de validité, au fur et à mesure que les objets et concepts pertinents sont dégagés ainsi que leurs liens avec les théories existantes. C'est ce cheminement, entre preuves et réfutations, qui constitue alors la démarche scientifique en mathématiques,

Dans la logique de la science que propose Popper, l'usage du concept de corroboration permet d'éviter l'usage problématique, selon lui, des concepts "vrai" et "faux" car "ils décrivent ou évaluent un énoncé sans tenir compte d'aucun changement empirique". Le problème que souhaite mettre en évidence Popper est que, dans l'absolu, les termes vrai et faux sont utilisés selon leur valeur intemporelle admise et qu'ils sont peu adaptés pour s'accorder aux changements des propriétés des objets physiques. Popper explique en effet, qu'il n'est pas habituel de dire d'un

¹ Heuristique: qui sert à la découverte.

énoncé qu'il était parfaitement vrai hier mais qu'il est devenu faux aujourd'hui. Donc, pour Popper, la différence fondamentale entre vérité [certaine] et corroboration apparaît clairement : un énoncé est corroboré ou non, selon une évaluation intemporelle, relative à "la mise en évidence d'une relation logique déterminée entre un système théorique et un certain système d'énoncés de base acceptés". La science ne produirait ainsi pas de vérité, mais elle progresserait en définissant, en restreignant les domaines de validité de ses modèles et théories, voire en changeant pour de plus appropriés. La science s'organiserait autour de conjectures et de réfutations. On souscrit aux conjectures lorsque les tentatives de réfutation n'ont pas abouti.

Popper apporte ainsi son principe fondamental de naissance intersubjective de l'objectivité : l'objectivité naît des confrontations qui se font au sein de la communauté scientifique. Ainsi, l'objectivité apparaît comme étant issue d'un consensus social autour d'une proposition initialement subjective. D'autres auteurs vont ensuite nuancer les propos de Popper.

Thomas Kuhn (1922-1994) s'oppose à Popper sur i) la conception linéaire et continue de la marche des idées scientifiques et sur ii) l'idée qu'une "contre-preuve" conduit nécessairement à la réfutation de la théorie en question. Il se base sur une analyse sociologique et historique des sciences. Il propose que dans le cadre de la science normale, les chercheurs adhèrent à des normes et à des règles de la pratique scientifique et que c'est cela qui fait la différence avec une pseudoscience. Leur recherche est cadrée par un paradigme, qui fournit un moule d'interprétation du réel et les méthodes et questions légitimes qui guident les recherches (Kuhn, 1972). Le paradigme repose également sur des impératifs métaphysiques (ainsi il ne repose pas uniquement sur des propositions réfutables). Les scientifiques ont l'illusion de savoir comment est constitué le monde. Ainsi, les résultats attendus appartiennent à une gamme restreinte et le travail du chercheur consiste à savoir comment y parvenir. Si un résultat n'appartient pas à la gamme de ce qui est attendu, il est ignoré au lieu de conduire à la réfutation de la théorie de base. Avant la première période de science normale, la période préparadigmatique (ou préscientifique) est caractérisée par l'absence d'acquis communs. C'est le cas de la physique avant Newton, de la chimie avant Lavoisier ou de la biologie avant la théorie cellulaire. Les théories sont alors puisées dans la métaphysique et les publications sont des livres généraux adressés à tous. Pendant une période de science normale, le paradigme grossit, accumule progressivement du savoir mais également des anomalies. Ces anomalies sont des faits, soit qui entrent en contradiction avec le paradigme, soit dont l'explication résiste à la méthodologie paradigmatique. Elles sont mises de côté, mais à un moment, lorsqu'elles deviennent trop importantes, on peut entrer dans une période de crise (qui s'oppose à la science normale). Là, les bases du paradigme sont remises en question. La crise peut se résoudre avec l'adhésion à un nouveau paradigme, ce qui signe une révolution scientifique. C'est ce qui s'est passé lors du passage du paradigme newtonien au paradigme einsteinien.

Imre Lakatos (1922-1974) est en désaccord avec Kuhn, qui pense que le choix d'un paradigme neuf est arbitraire, ou relatif à des préférences culturelles extrascientifiques. Lakatos (1977) prône une épistémologie rationaliste, c'est-à-dire une approche qui étudie la science seulement d'un point de vue rationnel et non sociologique. Il pense qu'il n'existe pas d'expérience cruciale qui réfuterait une théorie mais des programmes de recherche en concurrence. A chaque programme son heuristique (un ensemble de techniques admises pour la solution des problèmes). La contrainte négative c'est qu'on ne peut pas changer les hypothèses de base de la théorie. Ces hypothèses non modifiables, qui sous-tendent le programme de recherche, constituent le noyau dur de la théorie. Ce noyau dur est entouré d'une ceinture protectrice, dans laquelle se trouvent des hypothèses auxiliaires et des conditions initiales qui, elles, peuvent être

modifiées pour mieux coller avec les observations, et maintiennent ainsi l'intégrité du noyau dur. La contrainte positive est la direction donnée par le programme de recherche dans le but de compléter le noyau dur. Un programme progressif permet des prédictions inédites et la découverte de faits inattendus, au contraire d'un programme dégénéré qui se borne à fabriquer des hypothèses *ad hoc* pour sauver son noyau dur face aux anomalies.

3- La vision actuelle des caractéristiques de "la démarche scientifique"

a- Le constructivisme

Bachelard, Popper, Kuhn et Lakatos ont largement influencé les domaines de la philosophie des sciences, de l'épistémologie et de la didactique. Ils ont permis de remettre en question la vision spontanée de la démarche scientifique. Une synthèse, à laquelle adhère la majorité des épistémologues actuels, est connue aujourd'hui sous le nom de constructivisme, théorie de l'apprentissage développée, entre autres, par **Jean Piaget** (1896-1980) dont les points principaux sont exposés ci-après :

- Toute connaissance est liée au sujet qui connaît. Ainsi, l'opinion, la conviction, le point de vue, les croyances participent à la démarche scientifique.

- Toute connaissance est issue d'un processus de construction, processus qui consiste en une réorganisation qualitative de la structure initiale des connaissances, et pas seulement en un accroissement quantitatif.

- Avant d'aboutir à une "révolution" théorique, on procède par ajustements successifs des modèles et théories disponibles, consistant souvent à définir ou préciser leurs domaines de validité. Les révolutions correspondent à l'abandon complet d'un modèle ancien ou la redéfinition d'un concept (tel que le temps en relativité). En effet, selon Kuhn, les mondes conceptuels de deux paradigmes successifs sont incommensurables, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de mesure commune, et que les scientifiques d'avant et après une révolution scientifique habitent des mondes différents (ex : mécanique classique/mécanique quantique et relativité, optique/électromagnétisme/théorie des champs).

- La découverte scientifique. Le terme de "découverte" scientifique est ancré dans une vision réaliste où le scientifique n'aurait qu'à révéler le monde tel qu'il est. Cependant, si on admet ce qui a été énoncé précédemment à propos des observations, de l'objectivité et des faits, on en déduit que l'activité scientifique ne conduit pas à des découvertes, mais que ces objets socialement institués sont plutôt issus d'un processus d'invention : leur "création", ou plutôt leur construction, correspond à une standardisation socioculturelle inscrite dans un projet et dans une histoire humaine, c'est-à-dire que pour un résultat, un fait donné, il existe une infinité d'interprétations possibles qui pourraient le décrire. Ainsi, on ne peut pas dire que les résultats nous obligent à voir le monde d'une manière ou d'une autre. Une interprétation n'est pas une constatation, mais un coup de force par lequel on décide de voir les choses d'une certaine manière. La notion de "découverte" implique une existence antérieure.

b- L'étude des sciences (sciences studies) dans les trois dernières décennies

Ces trente dernières années, l'histoire et la philosophie des sciences ont connu un renouveau. La science est maintenant abordée non plus comme un savoir mais comme une institution (Pestre, 2006). Elle est considérée comme un ensemble de pratiques et de faire, au laboratoire ou sur le terrain, et plus seulement comme un ensemble conceptuel (*ibid.*). Contre l'idée du caractère universel des résultats et démonstrations, elle met aujourd'hui au cœur de ses préoccupations la question de ce qui emporte la conviction, de ce qui fait preuve ici et là (*ibid.*). Les scientifiques sont en interaction constante avec le monde matériel pour établir les faits, et ils produisent des résultats laissant toujours place à la controverse et au débat (*ibid.*). Certes, on ne peut pas dire comme **Feyerabend**¹ (1975) que "tout est bon", mais dans le champ de contraintes fortes qu'impose l'interaction du sujet avec le monde matériel dans l'acte expérimental, une grande liberté de lecture est laissée à celui qui fait parler la nature (Pestre, 2006).

Par ailleurs, dans les discours généralement tenus sur la science, la dimension normative, même si elle est implicite est centrale (*ibid.*). Parce que parler de la science renvoie à l'objectivité et à la vérité, toute analyse trop radicale à son endroit suscite une grande incompréhension, voire de l'indignation (*ibid.*).

Ces deux points de vue sur la science orientent, sans doute, la manière dont est conçu l'apprentissage de la "démarche scientifique" à l'Ecole, à la fois technique et sociale.

4- Les objets et concepts des sciences "dures", similitudes et différences

Chaque science possède un champ d'étude déterminé. Certains champs se recoupent mais ils sont alors identifiés en tant que champs spécifiques avec leurs propres théories et méthodes. Nous n'aborderons ici que les domaines des mathématiques, physique, chimie et biologie.

a- Les phénomènes étudiés

- **En mathématiques.** L'objet mathématique est abstrait, même si certaines mathématiques ont été développées pour répondre aux besoins des sciences de l'empirie². Le statut des idéalités mathématiques est discuté par les philosophes des sciences, peu de mathématiciens s'intéressant aux questions ontologiques³.

- **La physique** tente d'expliquer les phénomènes de la nature non-vivante. Ces phénomènes ont un caractère déterministe dont la prédiction peut être extrêmement précise. Toutefois avec la mécanique quantique et la description de ce qu'on appelle le chaos⁴, le déterminisme peut aussi

¹ Paul Feyerabend (1924-1994) est un philosophe des sciences. Il devint célèbre pour sa vision anarchiste de la science et son déni de l'existence de règles méthodologiques universelles.

² Empirisme : système de philosophie dans lequel l'origine de nos connaissances est uniquement attribuée à l'expérience. Il se dit dans un sens plus général de toute méthode qui prétend ne s'appuyer que sur l'expérience.

³ L'ontologie est définie comme la "science de l'être en tant qu'être". L'objet, ici "les mathématiques", est alors conçu en englobant tous ses aspects et tous ses niveaux.

⁴ La théorie du chaos traite des systèmes dynamiques rigoureusement déterministes mais qui présentent un

se décrire avec des probabilités et des événements aléatoires.

- **La chimie** (ou "les Sciences Chimiques" selon la terminologie du CNRS) est une science dont les contours peuvent être assez bien définis¹. Elle recouvre cependant plusieurs types d'activités scientifiques que l'on pourrait classer autour de 3 verbes (actions) : "Construire" de nouvelles molécules ou nouveaux systèmes moléculaires, "Analyser" leur composition et leur structure et "Comprendre" les mécanismes "cachés" derrière le "Construire" et l'"Analyser". Notons toutefois que dans la plupart des cas, le chercheur chimiste est confronté de manière plus ou moins simultanée à ces trois actions.

- **La biologie** tente d'expliquer les phénomènes de la nature vivante. Elle essaie maintenant d'intégrer à l'étude de structures plus "simples" (neurones, cellules) celle d'organes ou de systèmes (ex: cerveau, écosystème). Le réductionnisme jusqu'alors prédominant est aujourd'hui accompagné d'une vision plus globale du fonctionnement des êtres vivants et d'une attention aux phénomènes émergents².

b- Les conjectures et les hypothèses

- Il est d'usage d'appeler en mathématiques "conjecture" un énoncé que l'on pense être vrai et que l'on va s'attacher à démontrer. La conjecture constitue de fait un des moteurs de l'activité mathématique. Une conjecture peut servir d'hypothèse de travail pour démontrer d'autres conjectures.

- En physique, chimie et en biologie, on émet des hypothèses... mais on utilise fréquemment les mathématiques pour confronter les hypothèses aux résultats de l'expérience.

c- Les méthodes : démonstration et expérimentation

- **En mathématiques** : une conjecture doit être démontrée formellement (démonstration). Seuls les axiomes, qui servent à fonder une théorie, ne sont pas démontrés. Toute démonstration se décrit comme une chaîne d'identités reliant des propositions et suppose une base axiomatique en logique. Cependant, on peut concevoir une expérimentation en mathématique. Ainsi, le quasi-empirisme est une orientation de la philosophie des mathématiques datant de la fin des années soixante et dont plusieurs idées essentielles se trouvent chez Lakatos. Dans ce mouvement, la pratique des mathématiques est au cœur de la réflexion, mais des idées essentielles sont également empruntées aux sciences empiriques : expérience mathématique, fait mathématique, reconnaissance du rôle fondamental de l'induction, contestation du caractère a priori de la vérité mathématique, faillibilisme, exploration et investigation heuristique systématisées, importance du succès des théories comme critère de leur vérité ou de leur consistance, etc. Pour Putman (1975), bien que les mathématiques soient davantage "a priori" que la physique, il existe en mathématique des tests quasi-empiriques et les révolutions conceptuelles qui en résultent conduisent à des changements de paradigme. Avec l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs, nous assistons à un regain de l'expérimentation en mathématique, l'ordinateur jouant

phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initiales » qui, modulant une propriété supplémentaire de récurrence, les rend non prédictibles en pratique sur le « long » terme.

¹ Mettre en association des molécules (ou plus rarement des atomes isolés) de manière à en former de nouvelles (quel que soit l'état de la matière : gaz, liquide, solide).

² Les phénomènes émergents sont des phénomènes macroscopiques imprévisibles voire inexpliqués, qui prennent la forme de régularités statistiques, de structures relationnelles ou même d'entités originales.

le rôle d'outil de laboratoire, outil de découverte et de création, de vérification et parfois de démonstration. Cependant, certains mathématiciens refusent les démonstrations achevées par ordinateur (théorème des quatre couleurs par exemple).

- **En physique, chimie et biologie** on réalise des expérimentations ; terme qui aujourd'hui revêt toujours le caractère usuel mais qui se trouve également de plus en plus souvent rattaché à la simulation numérique (on utilise le terme d'expérience numérique). Le développement technologique permet l'avancement de ces sciences et réciproquement. Ainsi s'ouvrent de nouveaux champs de recherche.

- Un cas particulier est constitué par la **chimie de synthèse**. En effet, celle-ci n'a pas vocation à étudier les propriétés des objets qu'elle étudie, mais uniquement à en créer de nouveaux. Le chimiste de synthèse est un créateur d'objets (molécules ou assemblage moléculaire). Il s'appuie, bien évidemment, sur des lois de comportement vérifiables (falsifiables). Mais ces lois (ou modèles phénoménologiques) sont peu nombreuses et leur utilisation renvoie plutôt à des tendances plutôt qu'à des prévisions exactes. Cela découle essentiellement d'une part de l'aspect réductionniste des modèles et, d'autre part, des approximations mathématiques utilisées dans le but d'aboutir à des lois facilement calculables. Il n'y a pas, non plus, toujours de solution unique et exacte au problème posé. Le chimiste de synthèse doit donc avoir recours à un savoir-faire empirique qui repose sur une accumulation assez considérable de connaissances acquises soit par les autres au fil des années, soit par sa propre expérience –souvent par une approche "essai/erreur". On pourrait presque dire que la synthèse en chimie est tout autant une science qu'un art.

d- Les lois

- **En mathématiques**, les lois sont les théorèmes (dont la vérité est établie rigoureusement suivant les canons en vigueur) plus que les axiomes. En effet, la donnée des axiomes suppose des critères (choix, évidence, constructibilité) et engage des attitudes épistémologiques par rapport aux démonstrations qui vont s'ensuivre. Par exemple, les intuitionnistes qui n'admettent pas le principe du tiers exclu (P ou non P est vrai) refusent toute démonstration d'existence n'aboutissant pas à la production de l'entité en question.

- **En physique**, en principe, aucune loi ne contredit une autre loi et les lois sont considérées comme stables dans l'espace et le temps; c'est ce gage d'universalité qui confère à la science une bonne part de son statut. Les lois peuvent se ramener à une succession de lois simples même si l'univers est complexe. Par ailleurs, les lois physiques sont traduisibles en formulations mathématiques et ceci induit un lien fort entre physique et mathématique.

- **En biologie**, on n'énonce plus beaucoup de lois la plupart de celles ayant été émises n'ayant pas résisté au critère de réfutabilité de Popper. Toutefois, certains modèles théoriques qui n'ont pas été réfutés sont considérés comme des lois implicites qui sont alors formulées en langage courant.

e- Les théories et les modèles théoriques

Ce que l'on appelle un fait est déjà un modèle théorique d'interprétation qu'il faudra d'ailleurs parfois établir ou prouver. La preuve consiste en une relecture du monde utilisant le modèle qu'on a posé. "Prouver" consiste donc à montrer l'intérêt du modèle théorique en question. Un

tel intérêt correspond à la façon dont cette manière de représenter le monde peut être féconde par rapport à nos projets. C'est ce qui conduit Fourez (2002) à appeler ces modèles des "technologies intellectuelles": il n'y a pas de modèle meilleur qu'un autre (ni plus vrai), il y a des modèles plus ou moins adaptés à un projet particulier et selon les contraintes liées au contexte (d'un point de vue matériel, social, financier, institutionnel, éthique,...). Les modèles ne seraient donc pas une représentation du monde mais une représentation de notre champ d'action possible dans le monde. On peut comparer un modèle avec une carte géographique: il ne s'agit pas d'une représentation dont la propriété est qu'elle soit vraie, mais qu'elle dépende d'un projet ; elle devient objective lorsque l'on sait s'en servir, que l'on connaît les symboles, etc. : lorsqu'elle a prouvé son efficacité. La preuve d'un modèle ne concerne pas sa véracité ou sa représentation exacte du monde réel, mais son utilité, son efficacité, en termes de cohérence et de prédiction. Lorsqu'il s'agit de sciences expérimentales, ce modèle doit permettre de poser certaines questions et d'y répondre par l'expérience: il a une efficacité pratique.

- **Les théories mathématiques** contemporaines portent l'empreinte du courant formaliste et structuraliste incarné en France par **Bourbaki** (pseudonyme d'un groupe de mathématiciens formé dans les années 1930-60) qui s'est traduit jusque dans les programmes d'enseignement (maths modernes). Les structures abstraites, que l'on peut concevoir comme des modèles internes aux mathématiques, permettent de rapprocher des domaines de celles-ci auparavant séparés et se montrent d'une très grande fécondité. En mathématiques appliquées, un modèle mathématique est une traduction de la réalité pour pouvoir lui appliquer les outils, les techniques et les théories mathématiques, puis généralement, en sens inverse, la traduction des résultats mathématiques obtenus en prédictions ou opérations dans le monde réel. Dans toute modélisation, il y a un choix *a priori* de l'espace mathématique servant à repérer l'ensemble des phénomènes.

- **En physique**, à partir d'une observation et de la formulation d'un problème, la modélisation d'un processus complexe revient à identifier les grandeurs, variables ou paramètres pertinents, à justifier les paramètres négligés ou négligeables à partir d'analogies, de calculs d'ordres de grandeurs ou d'approximations quantifiables (rôle de l'intuition et de l'imagination). Ce processus constitue le cœur de la démarche du physicien. L'analyse d'un résultat d'expérience nécessite toujours plus ou moins explicitement une réflexion ou un diagnostic sur l'incertitude de mesure (de plus en plus en terme probabiliste ou statistique) ou une limite de validité. La physique fournit ainsi des modèles et théories de la réalité ; elle en donne une représentation. A la notion de modèle est souvent associé un caractère explicatif réducteur, c'est à dire qu'on l'accepte comme description partielle d'un phénomène; on rencontre des modèles dits phénoménologiques, terme qui en traduit un caractère incomplet. Plusieurs modèles peuvent coexister, chacun ayant sa zone de validité et ses avantages spécifiques. Par exemple le modèle de Bohr, comme première approche de description de l'atome et malgré ses limites, peut présenter un intérêt pédagogique s'il est assorti de précautions de présentation. Les principes d'économie et de fécondité sont mis en jeu pour éventuellement choisir entre plusieurs modèles et théories.

- **En chimie** aussi, les développements récents de l'outil informatique et de nouveaux modèles (ex: théorie de la fonctionnelle de la densité) permettent de construire des modèles mathématiques fondés sur des lois physiques à partir desquels, le chercheur peut d'une part construire des molécules (ou des édifices moléculaires) et, d'autre part analyser leurs caractéristiques. Il faut cependant rappeler que, dans ce cas, les modèles ne peuvent toujours pas rendre compte de toute la complexité de la "réalité" expérimentale.

- **En biologie**, on trouve d'une part des "modèles de travail", ils sont considérés comme des hypothèses et leur rôle est de constituer un outil de confrontation à l'expérimentation. Ils sont utilisés pour relire le monde à l'aide de la grille interprétative qu'ils fournissent. Cette relecture permet de les "vérifier" ou de les infirmer et donc, respectivement, d'y accorder plus de confiance ou de modifier la représentation des relations entre les éléments en leur sein. Par ailleurs d'autres modèles, au préalable modèles "de travail" sont passés dans le savoir; ils sont appelés "lois" ou "connaissances", car ils font déjà l'objet d'un consensus et d'une standardisation au sein de la communauté disciplinaire. Ils servent de référence, d'outils de base à la construction d'autres modèles de travail (notamment en donnant leur sens aux éléments et en cadrant le type de relations possibles ou interdites).

f- Le cas particulier des mathématiques

De nombreux auteurs ont souligné l'extraordinaire efficacité des mathématiques en sciences physiques/chimiques. Comment expliquer cette efficacité ?¹ Et tout d'abord qu'entend-on par efficacité ? Quatre paramètres peuvent décrire l'efficacité d'une science : sa capacité descriptive, sa valeur prédictive, sa puissance explicative et son potentiel heuristique. On s'aperçoit maintenant que les mathématiques jouent un rôle de plus en plus important dans de nombreux autres domaines que la physique, en particulier en biologie.

Une raison à cela serait due au langage mathématique qui permet aussi de faire des liens entre des phénomènes apparemment sans relation. Les mathématiques permettent aussi de définir des concepts que le langage ordinaire ne permet pas, elles favorisent donc un couplage entre pensée, action, réel et langage.

5- Conclusion : la démarche scientifique des scientifiques et la démarche scientifique en classe

En ce qui concerne la "démarche scientifique" des scientifiques, nous pouvons donner une réponse à la première question posée en introduction : il n'y a pas de démarche scientifique "statuifiée" mais des procédures multiples qui ne sont considérées comme scientifiques que lorsqu'elles ont été validées suivant les différents critères que nous avons décrits. La démarche scientifique est avant tout une production sociale et elle n'est considérée comme telle que parce que l'ensemble des personnes jugées compétentes dans une société donnée l'a avalisée. En ce sens, elle est commune à toutes les sciences qui utilisent ensuite des objets, méthodes, concepts et théories différentes. Il faudra comprendre que chaque discipline apporte un type d'explication et il sera important de définir pour chaque science son domaine de validité (Morange, 2005).

Cette "démarche scientifique" pratiquée par les chercheurs ne peut pas être enseignée comme une technique et les textes officiels demandent maintenant que les enseignants mettent en œuvre une "démarche d'investigation". Cette démarche d'investigation s'appuie sur le questionnement des élèves sur le monde réel et sur la résolution de problèmes. Les investigations avec l'aide du professeur, l'élaboration de réponses et la recherche d'explications ou de justifications débouchent sur l'acquisition de connaissances, de compétences méthodologiques et sur la mise au point de savoir-faire techniques. On constatera l'aspect réducteur de la démarche

¹ Conférence de Dominique Lambert, IREM, 5 décembre 2007.

d'investigation par rapport à la démarche scientifique.
Pouvons-nous alors répondre aux deux questions suivantes?

1) Pourquoi l'apprentissage de la "démarche scientifique" sous la forme de "démarche d'investigation" fait-il partie des programmes scolaires actuels ?

Comme nous l'avons vu avec D. Pestre (2006), la science est maintenant abordée non plus comme un savoir, mais comme une institution. Elle est "considérée comme un ensemble de pratiques et de faire, au laboratoire ou sur le terrain, et plus seulement comme un ensemble conceptuel" (*ibid.*). Dans cet ordre d'idées, on considérera l'apprentissage commun aux disciplines scientifiques comme un apprentissage technique¹ dans une démarche hypothético-déductive. G. Bateson (1977), qui a hiérarchisé les apprentissages scientifiques dans des niveaux de complexité croissante, l'appelle le niveau I : capacité d'appliquer des concepts, des règles, des procédures dans le même domaine où ils ont été appris.

Cependant, cet apprentissage de "démarche d'investigation" ne permet pas de repérer la pensée d'autrui², de surmonter les "ruptures épistémologiques", de donner la capacité d'affronter les révolutions scientifiques, ni celle d'ouvrir son référentiel individuel à la critique (Favre, 2007). D. Favre souligne que la spécificité de l'apprentissage scientifique réside dans le fait qu'il ne se situe pas au même niveau que la majorité des apprentissages fondamentaux. Cet apprentissage devrait en effet nous fournir un outil nous permettant d'être informé sur nos productions mentales et nous donner ainsi une autonomie intellectuelle, c'est-à-dire, la "capacité à pouvoir modifier ses représentations mentales lorsque celles-ci sont infirmées par des contre-évidences" (*ibid.*).

2) Est-il justifié de considérer l'acquisition de la "démarche scientifique" et de la "démarche d'investigation" comme l'acquisition d'une compétence ?

Comme nous venons de le voir l'acquisition de la démarche d'investigation est une acquisition technique, c'est une compétence, mais elle réduit la perception de la science à un simple "faire de la science". Au contraire, nous pensons qu'il faut élargir la conception de la science et ne pas la baser sur la "méthode" ou "démarche d'investigation" uniquement. J'évoquerai ici trois situations qui me paraissent devoir être abordées avec une démarche scientifique telle que nous l'avons décrite.

a- L'interdisciplinarité

L'établissement d'un socle commun de connaissances et de compétences est une disposition majeure de la loi d'orientation et de programme pour l'avenir de l'École du 23 avril 2005. Ce socle commun est défini en le liant à la fois aux enjeux de la scolarité obligatoire, aux impératifs de formation tout au long de la vie, à la construction de la personnalité et à la vie en société. Un des sept piliers de ce socle concerne les principaux éléments de mathématiques et la culture scientifique et technologique.

¹ Nous donnerons comme exemple l'évaluation de l'épreuve de travaux pratiques du baccalauréat en Sciences de la Vie et de la Terre (exemple : recherche d'une éventuelle liaison entre gènes chez la drosophile). Capacités testées : - comprendre la manipulation ; - utiliser la loupe binoculaire (ou dans des exemples autres : base de donnée ou logiciel de modélisation) ; - traduire une observation par un schéma ; - présenter des données sous forme d'un tableau ; - appliquer une démarche explicative ; - gérer et organiser le poste de travail.

² Dans notre exemple, on demande " Justifier votre réponse et discuter la valeur de vos seuls résultats".

On constate, de nos jours, que les métiers en évolution ne relèvent plus d'une approche disciplinaire unique mais sont par nature transdisciplinaires. Pour envisager l'apprentissage des éléments scientifiques dans une exigence de perspective de formation tout au long de la vie, il est alors nécessaire de mettre en place des approches spécifiques, et l'une d'entre-elle peut être la compréhension de ce qu'est la science et la démarche scientifique.

Dans ce cadre, la formation tout au long de la vie pourrait devenir son propre paradigme, avec un échange réciproque permanent entre connaissance et formation. Comprendre la démarche scientifique en général et les particularités des différentes sciences pourrait permettre d'articuler, c'est-à-dire de faire coexister, les thèmes explicatifs différents en douceur. Ainsi l'utilisation des différents types d'explication d'un phénomène en serait facilitée: "il ne s'agit pas d'unifier les explications scientifiques mais la recherche d'une articulation est toujours un processus difficile, perpétuellement menacé par la volonté hégémonique de chaque principe d'intelligibilité et de ceux qui les portent" (Morange, 2007). Comprendre la démarche scientifique peut donc contribuer à nous faire accepter la coexistence de schèmes explicatifs de nature différente.

b- Les pseudosciences

La société actuelle est largement tributaire de la science et de la technologie. Cependant, il semble bien que si l'on profite au quotidien des retombées de l'activité scientifique, peu de gens comprennent encore les exigences reliées aux conditions de l'esprit scientifique et l'essor des pseudosciences constitue un fait social avéré (Larivée, 2006).

Pour parvenir à leurs fins les "pseudo-scientifiques", répertorient dans leur système de croyances tantôt certains concepts des sciences dures, tantôt une part du vocabulaire scientifique, ou encore des aspects technologiques dérivés de la science dans des systèmes de validation non-scientifique (voir annexe 1). Il ne paraît donc pas raisonnable de distinguer les sciences des pseudosciences sur la base des méthodes seules. Au contraire, "faire valoir la valeur de la méthode scientifique, ce sera aussi développer chez les enfants et les adolescents la capacité de supporter l'incertitude, de renoncer aux absolus, d'acquérir un solide sens critique et une grande humilité compte tenu de la disproportion du connu comparativement à ce reste à découvrir" (*ibid.*).

c) Le débat citoyen

La notion de citoyen scientifique (Irwin, 2001) renvoie à la conscience du mixage de la science et de la société. Il implique que, non seulement le savoir scientifique est important pour la société dans nos sociétés contemporaines, mais aussi que les citoyens peuvent avoir des demandes légitimes sur la recherche scientifique. Cette notion peut donc être perçue comme un idéal normatif concernant une forme appropriée de gouvernance démocratique dans une société de plus en plus dépendante du savoir scientifique. Cette tendance de la médiation scientifique et technique accompagne le développement de procédures participatives visant à associer les citoyens aux choix scientifiques et techniques. Ces procédures ont été initiées dans les années 1980 au Danemark sous la forme de conférences de consensus puis se sont diversifiées, avec des adaptations propres à chaque pays. Une telle forme de gouvernance devrait donc s'appuyer sur un "citoyen scientifique" capable de participer à des débats (bioéthique, OGM, etc.), et dont le rôle soit légitime.

Construire un tel "citoyen scientifique" implique de lui donner une formation lui permettant d'appréhender les multiples facettes, scientifiques mais aussi sociales ou économiques, des

questions qui se posent à la société d'aujourd'hui. La compétence que l'on vise à long terme en invitant les élèves, citoyens en formation, à réfléchir et à débattre sur les théories mêmes et pas seulement sur leurs applications, est de les entraîner suffisamment à proposer et à critiquer plusieurs sortes de raisonnements scientifiques, afin que par la suite non seulement ils gardent cette habitude hors de l'école, mais qu'en plus ils l'enrichissent et l'affinent de leurs expériences de vie (Legrand, 2006). La formation des jeunes citoyens à comprendre ce qu'est la "démarche scientifique" prend alors tout son intérêt.

6- Bibliographie

- Bachelard G. (1971) *Epistémologie*. Presses Universitaires de France.
- Bateson G. (1977) *Vers une écologie de l'esprit*. Le Seuil, Paris.
- Durkheim E. (1938) *L'évolution pédagogique en France*. Quatridge. Presses Universitaires de France, Paris.
- Favre D. (2007) *Transformer la violence des élèves : Cerveau, motivations et apprentissage*, Dunod, Paris.
- Fourez G. (2002) *La construction des sciences. Les logiques des inventions scientifiques*. Editions De Boeck Université (Coll. Sciences éthiques sociétés).
- Irwin A. (2001) *Constructing the scientific citizen: science and democracy in the biosciences*, *Public Understanding of Science*, vol.10, n°1.
- Kuhn T. (1972) *La structure des révolutions scientifiques*. Editions Champs Flammarion.
- Lakatos I. (1977) *Proofs and refutations, the logic of mathematical discovery*, Cambridge University Press.
- Larivée S. (2006) *Science contre pseudosciences : un combat inégal*, http://www.sceptiques.qc.ca/assets/docs/larivee_science.pdf
- Legrand M. (2006) *Le principe du "débat scientifique" dans nos classes et nos amphithéâtres, pourquoi et comment ? Etat de nos recherches*, http://www-irem.ujf-grenoble.fr/new2006/Debat_scientifique/debat_s_principes.pdf
- Morange M. (2005) *Les secrets du vivant, Contre la pensée unique en biologie*. Ed. La Découverte, coll. "Sciences et Société".
- Pestre, D. (2006) *Introduction aux Sciences Studies*. Ed. La Découverte, Paris.
- Popper K. (1994) *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*, 1994, Ed. Payot, Coll. Bibliothèque scientifique.
- Pour la Science (2005) *Les chemins de la logique*. Dossier.
- Putman H. (1975) *What is mathematical truth ?* in Putnam H. : *Mathematics, Matter and Method*. Philosophical papers. vol. 1.. Cambridge University Press. pp. 60-78 (se trouve en français sur le Web).
- Romainville M. (2006) *Les compétences en Belgique*. Les cahiers pédagogiques n°439, janvier.

Annexe 1 - Quelques procédés de validation non scientifiques (Larivée, 2006)**A. Eu égard à la théorie**

- a) Le recours à des théories invalidées ou non encore validées.
- b) On ne révisé pas la théorie et pour cause, elle est invérifiable.

B. Eu égard aux faits

- c) Le recours aux mystères (anomalies).
- d) Le mythe pour preuve.
- e) Vive les bonnes histoires, les anecdotes et les témoignages!
- f) L'analogie pour preuve.
- g) Les affirmations priment sur les démonstrations.
- h) L'effet Barnum.
- i) Les contradictions ne changent rien à la croyance.
- j) L'absence de faits confirme aussi la croyance.
- k) L'absence de reproduction des résultats.

C. Eu égard au fonctionnement de la science

- l) Le recours à Galilée.
- m) Le messenger est plus important que le message.
- n) Le rejet du fardeau de la preuve.
- o) La science n'explique pas tout.
- p) La confusion entre coïncidence, corrélation et causalité.
- q) La doctrine des vérités multiples, la version ésotérique du relativisme cognitif.
- r) Le critère de réfutabilité, ce mal aimé !