

L'investigation : fondements et démarches, intérêts et limites

Maryline Coquidé, UMR STEF, ENS Cachan, INRP, UniverSud Paris ;
maryline.coquide@inrp.fr

Corinne Fortin, UMR STEF, ENS Cachan, INRP, UniverSud Paris ;
corinne.fortin@inrp.fr

Guy Rumelhard, UMR STEF, ENS Cachan, INRP, UniverSud Paris ;
guy.rumelhard@wanadoo.fr

Nous analysons la démarche d'investigation préconisée dans les textes officiels de l'école primaire et du collège en explorant différentes formes d'investigation : l'Inquiry-based Science Education, le modèle pédagogique « Investigation-structuration », et l'enquête (Inquiry) de Dewey. Nous avançons ensuite quelques éléments pour caractériser l'investigation du vivant. Nous analysons enfin deux exemples – la classification phylogénétique et la ventilation – pour donner un contenu précis, aux interrogations épistémologiques discutées.

Depuis quelques années, les groupes de travail se succèdent, tant au niveau national qu'international, pour affirmer la nécessité d'un renouvellement de l'enseignement des sciences durant la scolarité obligatoire. Plusieurs rapports argumentent de l'exigence de repenser l'enseignement scientifique en s'appuyant sur l'investigation, d'une part pour rendre plus attractive l'image de la science et pour encourager les jeunes à s'orienter vers les études scientifiques (High Level Group, 2004 ; Rocard *et al.*, 2007), d'autre part pour changer les approches pédagogiques jugées trop cloisonnées (Rolland, 2006) et trop déductives (Bach, 2004 ; Rocard *et al.*, 2007).

Dans un premier temps, nous présentons le contexte institutionnel français de la mise en œuvre de la démarche pédagogique d'investigation (DI). Nous mettons cette démarche en perspective avec l'*Inquiry-based Science Education* (IBSE), qui s'est imposée dans les textes officiels de plusieurs pays anglo-saxons dans les années quatre-vingt-dix : *project 2061* et standards aux USA, module SCI du curriculum national anglais, etc. La démarche pédagogique d'investigation et *Inquiry-based*

Science Education sont-elles cependant identiques ? Quels sont les caractéristiques et le positionnement épistémologique de la démarche d'investigation comparés à d'autres dispositifs d'enseignement par investigation comme, par exemple, la pédagogie de l'éveil des années soixante-dix, le modèle pédagogique « *Investigation-structuration* » (INRP, 1980) ou l'*enquête (Inquiry)* défendue par Dewey ?

Nous analysons ensuite une conception de la démarche d'investigation préconisée qui pourrait apparaître réductrice dans une visée unificatrice des activités scientifiques scolaires. Nous avançons quelques éléments pour caractériser l'investigation du vivant. Nous nous appuyons sur des exemples pour l'enseignement des sciences de la vie, pour reprendre ces interrogations fondamentales, en mobilisant différentes conceptions épistémologiques.

I. Le contexte institutionnel de la mise en œuvre de la démarche d'investigation

1.1. Le contexte institutionnel français

La démarche d'investigation (DI), s'opposant à des démarches de « *présentation* » ou « *d'illustration* », valorise une démarche inductiviste. Balpe (2001) a ainsi montré l'importance historique d'une démarche inductive pour l'enseignement des sciences physiques en France : il faut procéder de l'observation des faits à l'élaboration des lois. C'est par une expérience, et non pas par l'exposé des lois, que la méthode préconisée incite à commencer le cours. L'éducation sensorielle et motrice est aussi mise en avant. Depuis près d'un siècle, les instructions officielles ont préconisé des méthodes s'appuyant sur une démarche inductive. Celles-ci ne seront cependant mises en œuvre qu'avec difficulté et ne seront généralisées que dans les années cinquante, dans les classes sciences expérimentales du lycée, sous l'impulsion de l'inspecteur général Charles Brunold avec la *méthode dite de redécouverte* (Gohau, 2002).

Aujourd'hui, la démarche d'investigation ne se limite pas à une approche inductiviste, elle est définie comme « *un processus intentionnel de diagnostic des problèmes, de critiques des expériences réalisées, de distinction entre les alternatives possibles, de planification des recherches, de recherches d'hypothèses, de recherches d'informations, de constructions de modèles, de débat avec ses pairs et de formulation d'arguments cohérents* » (Linn, David & Bell, 2004 : cité dans Rocard *et al.*, 2007). Elle est préconisée comme fer de lance de la rénovation de l'enseignement scientifique à l'école primaire et au collège. Dans le *Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école*¹ (France : MÉN, 2000), la DI est citée : « *L'approche*

¹ Le PRESTE, distinct de l'opération *La main à la pâte*, s'est appuyé sur l'expérimentation de *Lamap*. C'est en 1996, à l'initiative du prix Nobel Georges Charpak et de l'Académie des sciences, que l'opération de promotion des sciences à l'école primaire, *La main à la pâte*, centrée sur une démarche d'investigation, a été mise en œuvre.

pédagogique qu'il [PRESTE] induit est fondée sur le questionnement et sur l'investigation, constitutifs des disciplines scientifiques. Les élèves s'interrogent, agissent de manière raisonnée et communiquent. Les élèves construisent leurs apprentissages en étant acteurs des activités scientifiques ». Valorisée en premier lieu à l'école primaire, la DI est dorénavant recommandée pour l'ensemble des disciplines scientifiques et technologiques au collège : « dans la continuité de l'école primaire, les programmes du collège privilègent pour les disciplines scientifiques et la technologie une démarche d'investigation » (France : MÉN, 2008b, p. 4).

• Quelques caractéristiques de la démarche d'investigation

La démarche d'investigation, inscrite dans les textes officiels, se structure autour de principes fondamentaux, d'étapes d'organisation et d'activités des élèves.

– Les principes de la DI :

En 2001, le groupe technique associé au Comité de suivi du Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école présente un texte intitulé « Repères pour la mise en œuvre d'une démarche répondant au schéma : du questionnement à la connaissance en passant par l'expérience » (2001). Les divers aspects d'une démarche, désignée comme « démarche expérimentale d'investigation », y sont structurés selon deux principes : unité et diversité.

Le principe d'unité s'appuie sur une continuité entre le questionnement initial des élèves, l'investigation réalisée pour y répondre et l'acquisition des connaissances et des savoir-faire.

Le principe de diversité recommande de ne pas se limiter à la seule investigation expérimentale, mais d'explorer d'autres modalités d'investigation : « réalisation matérielle (construction directe, recherche d'une solution technique) ; observation, directe ou assistée par un instrument ; recherche sur documents ; enquête et visite ».

– Des moments-clés :

Cinq moments constituent le cœur de cette DI² :

- le choix de la situation de départ (par le professeur) ;
- la formulation du questionnement des élèves ;

2 Ces cinq moments peuvent être comparés à ceux préconisés dans le rapport nord-américain « *Inquiry and the national science education standards: A guide for teaching and learning* » : « The report further extended the ideas presented in the NSES and provided 5 essential features which inquiry should contain:

- learners are engaged by scientifically orientated questions.
- learners give priority to evidence, which allows them to develop and evaluate explanations that address scientifically orientated questions.
- learners formulate explanations from evidence to address scientifically orientated questions.
- learners evaluate their experiences in the light of alternative explanations, particularly those reflecting scientific understanding.
- learners communicate and justify their proposed explanations » (NRC, 2000).

- l'élaboration des hypothèses et la conception de l'investigation pour valider/ invalider ;
- l'investigation conduite par les élèves (expérimentation, recherche documentaire, etc.) ;
- l'acquisition et la structuration des connaissances (sous la conduite du professeur).

Ce canevas de séquence d'une investigation peut être rapproché de celui recommandé par l'introduction commune pour les disciplines scientifiques et technologiques au collège (France : MÉN, 2008b). Sept moments essentiels sont identifiés dans la démarche pédagogique : le choix d'une situation-problème ; l'appropriation du problème par les élèves ; la formulation de conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles ; l'investigation ou la résolution du problème conduite par les élèves ; l'échange argumenté autour des propositions élaborées ; l'acquisition et la structuration des connaissances et la mobilisation des connaissances.

On y trouve, incluse, l'approche hypothético-déductive d'une démarche expérimentale, avec un accent supplémentaire mis sur l'activité des élèves. Le protocole expérimental n'est pas imposé ou suggéré aux élèves par le professeur, il est laissé à leur initiative, lesquels le conçoivent et le réalisent pour tester leurs hypothèses.

• Rôle de l'enseignant et activités des élèves

D'après les instructions officielles, l'enseignant guide l'investigation, par le choix de la situation de départ pour motiver les élèves et par la sélection de leurs questions, en fonction des objectifs de connaissances et de compétences visés par le programme. À l'école primaire, il intervient aussi pour aider à la synthèse des connaissances, mais sans en préciser les modalités : « *des moments de synthèse opérés par le maître n'en sont pas moins indispensables pour donner tout leur sens aux pratiques expérimentales et en dégager les enseignements* » (France : MÉN, 2002, 2007).

• La construction du savoir par l'élève

Après l'introduction de la DI à l'école primaire en 2002 (France : MÉN, 2002), les programmes de collège en 2005 en appellent à l'investigation comme « *une démarche qui privilégie la construction du savoir par l'élève* » (France : MÉN, 2005). En 2006, le *Socle commun de connaissances et de compétences* fait référence à la démarche d'investigation pour les sciences expérimentales et souligne la distinction entre hypothèses vérifiables et opinions ; « *Leur étude (les sciences expérimentales et les technologies) contribue à faire comprendre aux élèves la distinction entre faits et hypothèses vérifiables d'une part, opinions et croyances d'autre part. Pour atteindre ces buts l'observation, le questionnement, la manipulation et l'expérimentation sont essentiels, et cela dès l'école primaire, dans l'esprit de l'opération "La main à la pâte"* »

qui donne le goût des sciences et des techniques dès le plus jeune âge » (France : MÉN, 2006). Enfin, en 2008, les nouveaux programmes de l'école primaire (France : MÉN, 2008a) et ceux du collège confirment que « les connaissances et les compétences sont acquises dans le cadre d'une démarche d'investigation qui développe la curiosité, la créativité, l'esprit critique et l'intérêt pour le progrès scientifique et technique » (France : MÉN, 2008b, p. 4).

Ainsi, la démarche d'investigation apparaît comme un nouveau sésame pour l'enseignement des sciences, en privilégiant la construction du savoir par l'élève, sans faire référence à un modèle pédagogique ou une théorie d'apprentissage.

• **Et dans les classes ?**

Qu'en est-il dans les classes ? Comment est mise en œuvre cette DI préconisée ? Au collège, du point de vue de l'inspection, un rapport de l'IGEN de physique-chimie, intitulé *La démarche d'investigation* (Pietryk et al., 2006), souligne que « de nombreux professeurs pratiquent déjà la recherche de situations-problème et l'appropriation du problème par les élèves » (*ibid.*, p. 6). Le rapport considère cependant que « les autres étapes leur semblent souvent plus difficiles à mettre en œuvre, et on voit bien que nombre d'entre eux craignent en particulier de "perdre le contrôle" en laissant trop la main à la classe, dans des phases cruciales comme celles de l'émergence des représentations des élèves, d'élaboration conjointe de propositions, ou de discussions » (*ibid.*). Une difficulté de structuration est soulignée : « quant à la phase d'opérationnalisation des connaissances, elle semble pour la majorité des professeurs hors de portée, par manque de temps essentiellement » (*ibid.*).

Du côté de la recherche, l'étude de Mathé, Méheut et De Hosson (2008), sur l'utilisation de l'investigation par les enseignants de physique-chimie au collège, conclut à une diversité et une ouverture de la démarche qui dépasse largement le cadre officiel prescrit.

La DI apparaît ainsi davantage comme un « label », assez souple et ouvert à différentes approches pédagogiques, pour éviter d'enfermer l'enseignant et les élèves dans une procédure rigidifiée.

1.2. Les recommandations relatives à l'investigation à l'étranger

• **En Angleterre**

En Angleterre, le projet Nuffield (1960-1970) mettait l'accent sur « *observation leading to discovery through experiment* » (*Teacher's guide 1*, p. 23) dans les sciences scolaires. Plus tard, dans les années soixante-dix et quatre-vingts, un balancement vers l'importance des processus et une référence à la pratique scientifique pour l'enseignement prirent place, minant la position d'observation de faits scientifiques et d'illustration de lois et de théories (Nott & Wellington, 1994). L'arrivée du *Curriculum National*, en Angleterre et en pays de Galles en 1989, avec l'introduction d'un module scientifique *Scientific Investigation*, représente une étape importante,

par la généralisation des recommandations concernant l'investigation³. Spécialement dédié à l'investigation et avec une procédure stricte de validation, le cadre promu dans ce module est celui d'un modèle d'activité scientifique inductiviste de contrôle de variables. Il recouvre les trois plages de : prévision et émission des hypothèses ; observation, mesures et manipulation de variables ; interprétation et évaluation de la preuve scientifique.

Ce cadre a été fortement discuté (Nott & Wellington, 1994 ; Duggan & Gott, 1995 ; Jenkins, 1995) car il excluait de larges aires de sciences validées qui ne contrôlent pas des variables, comme l'écologie, l'astronomie et la géologie. En 1994, le curriculum scientifique a été révisé, avec un nouvel intitulé de cadre d'investigation ouvert *Exploration of Science*, remplaçant « variables » par « facteurs », et avec une structure moins rigide d'évaluation.

• Aux USA

Aux USA, une tradition de démarche d'enquête, dans la lignée de Dewey (1859-1952) plus ou moins influencée ensuite par une démarche de découverte de Bruner (1961), inspire le système éducatif américain tout au long du xx^e siècle. Un pas a cependant été franchi au cours des années quatre-vingt-dix, avec le *Project 2061* (AAAS, 1993), puis une généralisation de l'*Inquiry-based Science Education* (IBSE) et la publication des *National Science Education Standards* (National Research Council, 1996). L'IBSE est organisée autour de questions pertinentes provenant des élèves et axées sur le réel (Hmelo-Silver, Duncan & Chinn, 2007), l'utilisation d'études ouvertes, sans objectif prescrit au préalable, et l'attachement à la compréhension de la nature des sciences (*nature of science*). Elle se distingue de l'enseignement par situation problème (*problem solving instruction*) qui met davantage l'accent sur le raisonnement hypothético-déductif. Ces démarches mettent toutes deux en avant l'initiative et le questionnement de l'élève, opposant « *direct instruction* » et « *inquiry oriented instruction* » (Lederman & Stefanich, 2004).

Cependant le terme « *Inquiry* » est polysémique (Anderson, 2007). En fait, c'est un *continuum* d'investigation qui peut être envisagé, avec une large gamme d'activités scolaires, plus ou moins ouvertes, depuis une exploration jusqu'à une résolution de problème, et plus ou moins guidées par l'enseignant (Anderson, 2002).

Depuis la publication de ces standards, plusieurs travaux ont tenté d'étudier les effets de l'IBSE sur les élèves, en particulier sur leur compréhension de la nature des sciences (Gibson & Chase, 2002 ; Dean & Kuhn, 2006). Quelques éducateurs ont préconisé un retour aux méthodes plus traditionnelles d'enseignement. La critique principale est que les élèves ont d'abord besoin de cadres et de conseils. Ce n'est que quand ils ont construit de la confiance en eux et sont devenus plus compétents qu'ils peuvent apprendre par l'IBSE (Kirschner *et al.*, 2006).

3 Dans ce *Curriculum National*, l'évaluation finale des élèves, à seize ans, a quatre composantes de même importance : chimie, physique, biologie et investigation pratique.

La DI, dans les textes institutionnels français, est plus centrée sur la démarche expérimentale et le recours à la situation-problème avec développement d'un raisonnement hypothético-déductif. Il y a une conception plus restrictive de l'investigation préconisée en France, au regard de celle qui se pratique outre-Atlantique ou qui figure dans les rapports internationaux.

2. Le positionnement épistémologique de la démarche d'investigation et autres dispositifs d'investigation

L'investigation, comme mise en situation de recherche de l'élève, n'est pas une nouveauté. Elle s'inscrit dans une tradition pédagogique, issue de Dewey, Bruner, Wallon, Freinet, Piaget, où l'élève est actif. Les pédagogues, en particulier les militants de l'*Éducation nouvelle*, ont mis en œuvre des innovations pédagogiques et ont théorisé l'importance de l'activité de l'élève dans les apprentissages scientifiques.

2.1. Différents dispositifs faisant appel à une mise en situation de recherche de l'élève.

• Les « méthodes actives » et l'« enquête »

L'évocation que les « méthodes actives » (France : MÉN, avril 2007) sont dans la ligne directe de l'investigation nous conduit 85 ans en arrière. Les mots « école active » sont lancés vers 1922 par le pédagogue suisse Adolphe Ferrière (1879-1960) (Hameline *et al.*, 1995) mais l'idée d'un enfant « actif » est déjà formulée dans le *Dictionnaire de pédagogie et d'instruction primaire* de Ferdinand Buisson (1841-1932) en 1882.

Aux États-Unis, John Dewey (1859-1952), pédagogue et philosophe cofondateur du pragmatisme, a développé l'idée d'une « pensée en action » qu'il a mise en pratique à l'école-laboratoire de l'université de Chicago de 1897 à 1903 (Deledalle, 1995). À la fin du XIX^e siècle, Anna Botsford Comstock a aussi contribué au développement des « études de nature » (*nature study*) aux États-Unis (Henson, 2007). Son approche promeut un apprentissage par l'usage des sens dans la nature, avec des sorties sur le terrain, des activités dirigées et une visée de développement de compétences d'observation et d'écriture⁴. L'*Union des naturalistes de l'enseignement public* créée en France en 1911⁵, propose, dès les deux premiers numéros de son bulletin, un compte rendu de la visite d'une enseignante, Anna Amieux, dans les écoles américaines où est mis en œuvre *Nature Study*, avec laboratoires et jardins pour les écoliers. Elle y décrit, avec enthousiasme, les activités de cette école élémentaire expérimentale annexée à l'université de Chicago (Amieux, 1912). Par exemple, l'enquête sur l'origine

4 Les « études de nature » connaîtront un déclin à la fin des années vingt, considérées alors comme trop émotives et esthétiques, avec une connotation féminine de pratique d'histoire naturelle.

5 Transformée en *Association des professeurs de biologie-géologie* (APBG), en 1965.

et la distribution de l'eau potable de la ville : « *les enfants montent eux-mêmes leurs appareils. Ils ont des carnets sur lesquels ils notent leurs questions, ce qu'ils font, puis des réponses numériques ou très sèches : j'ai vu, j'ai fait, j'ai obtenu... pas de commentaires, de simples notes de travailleurs, des dessins* » (*ibid.*, p. 10). Maître et élèves travaillent ensemble au même but, commente l'enseignante française en visite, rapportant les propos de l'un des acteurs : « *Notre idéal est de tenir en éveil et de développer les tentacules enquêteurs (tentacles of inquiry) de l'enfant, c'est-à-dire toutes ses puissances d'action et de réaction sur le monde extérieur* » (*ibid.*, p. 14.).

• Les activités d'éveil

Dans les années soixante et soixante-dix, l'investigation a connu un essor en France, avec les « activités d'éveil scientifiques » de l'école primaire. Le projet de la fondation Nuffield et les travaux conduits par l'INRP (Host & Martinand 1975 ; Host, Deunff & Deman, 1976) ont préconisé l'investigation⁶ comme procédure d'exploration du réel : observer, expérimenter, mesurer, schématiser, etc. Il s'agit, ici, d'articuler différentes formes d'activités scolaires (activités fonctionnelles et exploration, activités scientifiques d'investigation, activités de structuration).

2.2. Regards croisés entre l'IBSE et l'enquête de Dewey

L'enquête de Dewey s'inscrit dans une théorie de l'éducation. John Dewey la rattache aux besoins et à l'activité sociale de l'homme. Il parle d'enquête (« *inquiry* ») et de résolution de problèmes (« *problem solving* ») qui sont bien souvent des problèmes pratiques. On lui a d'ailleurs fait le reproche d'utilitarisme, ce dont il s'est défendu ardemment. Selon Dewey, l'école doit préparer à la démocratie et constituer une communauté dans laquelle l'enfant participe activement à la vie sociale en étant acteur de son savoir. L'objectif éducatif est alors de « *réinsérer les sujets d'étude dans l'expérience* » (Dewey, 1902/1913). Pour Dewey, « *l'enquête est la transformation contrôlée ou dirigée d'une situation indéterminée en une situation qui est déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu'elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié* » (1938/1993, p. 169).

Chez Dewey, il n'existe pas de dualisme entre la pensée et l'action. L'expérience vécue ou construite par l'enfant est source de connaissance. Cependant, la pédagogie active de Dewey n'est pas un activisme où l'enfant agirait sans désignation des objectifs d'apprentissage. Il ne s'agit pas de « faire pour faire » ou même de « faire pour comprendre », mais de soumettre la pensée à l'épreuve de l'action. Par exemple, les activités de menuiserie pour construire la maquette d'un bâtiment sont l'occasion, pour les élèves, de mettre en œuvre des solutions aux problèmes qui vont se poser pour réaliser la maquette. Ils devront ainsi prévoir, mesurer, comparer, calculer, ajuster, rectifier, etc., mais aussi discuter entre eux et réaliser

6 Les programmes de 1985 ont représenté un coup d'arrêt officiel à l'éveil et, avec elle, à l'investigation-structuration. Ce n'est qu'en 2000, avec le PRESTE, qu'une forme d'investigation réapparaît dans les textes officiels, sous les termes de démarche d'investigation.

un travail coopératif pour voir aboutir leur projet de maquette. L'enseignant crée les conditions pédagogiques pour stimuler les activités de l'élève et ainsi l'amener à résoudre les problèmes auxquels il sera confronté.

• **La démarche d'enquête**

Dans La théorie de l'enquête (1938), Dewey propose une matrice de l'enquête (« inquiry »), à la fois sous ses aspects psychologiques, sociologiques, et épistémologique. Ce n'est pas à l'aspect technique de la méthode scientifique qu'il se réfère, mais à son processus et à la façon dont les expériences sont utilisées, en différenciant l'expérientiel et l'expérimental. Il dénomme « situation » un environnement, physique ou culturel, mis au foyer de l'expérience par un objet, c'est-à-dire un environnement privilégié et expérientiel. Et c'est parce qu'une situation apparaît un moment indéterminée qu'un sujet se met « en quête ». La situation est « indéterminée » tant que le sujet la subit, elle devient « problématique » dès qu'il entreprend de la redresser, de la réorganiser. Dewey précise la place de l'expérimental dans un processus d'investigation, non pas au sens restreint de contrôle scientifique expérimental, instrumentalisé et mathématisé, mais au sens large où « expérimental » signifie à la fois « éprouvé », « mis à l'épreuve » et « expérientiel », c'est-à-dire en continuité organique et culturelle avec la situation (Deledalle, 1967/1993).

Cinq étapes, non linéaires, sont distinguées entre la reconnaissance d'un problème et sa solution. De nombreuses interactions interviennent dans le processus, les règles de l'enquête apparaissant au cours de son déroulement :

- perception par les élèves d'un problème significatif, d'un doute réel ou d'un besoin ;
- détermination ou construction du problème, ou clarification du besoin ;
- suggestion de solutions possibles (hypothèses) ou de plan d'action ;
- examen raisonné des suggestions et de leurs conséquences ;
- mise à l'épreuve de l'hypothèse ou du plan d'action retenu.

C'est d'abord la mise à l'épreuve des idées qui est mise en avant. C'est ensuite l'attention perspicace aux conséquences provoquées par la mise en œuvre de ces hypothèses. L'enquête se rapproche d'une démarche hypothético-déductive. Elle envisage une validation des propositions en relation avec la méthodologie utilisée, mais Dewey en revendique une nature logique, et non épistémologique. Dans la mise en perspective éducatrice de l'enquête, l'importance des différentes traces écrites, réalisées tout au long de la démarche, est soulignée. Le rôle de l'enseignant transparait à toutes les étapes. Il apparait dans l'aménagement de l'environnement scolaire. Il se manifeste également dans l'aide à clarifier le problème, les solutions possibles et leurs conséquences, dans l'organisation des mises à l'épreuve successives et des confrontations, dans l'incitation à réaliser différentes traces, et aussi dans la coordination de la réflexion et de la structuration.

Les contenus formalisés et systématisés de l'enseignement (et qu'on trouve généralement dans les livres) sont considérés comme distants *a priori* de l'expérience du jeune, qui cherche davantage de continuité avec sa vie quotidienne. En outre, Dewey conçoit l'achèvement de l'enquête par « l'assertibilité vérifiée », c'est-à-dire l'ensemble des hypothèses qui résistent à toutes les épreuves auxquelles l'homme les soumet.

Les modèles d'apprentissage scientifique constructivistes actuels divergent de cette analyse. Envisageant la construction d'un savoir scientifique en rupture par rapport au sens commun plutôt qu'en continuité, ils considèrent le familier à la fois comme une aide et un obstacle pour les apprentissages, et ils font intervenir la nécessité d'une confrontation à un savoir scientifique.

La DI emprunte à l'enquête de Dewey l'idée que tout apprentissage repose sur la nécessité, pour l'élève, de « faire des choses » qui ont sens pour lui. Par ailleurs, dans la DI, les activités des élèves sont engagées pour répondre à un problème posé en amont. Ce n'est cependant pas à partir des activités inscrites dans un projet (ex : la réalisation d'une maquette) qu'émerge le problème, comme le propose Dewey. Dans le cadre de la DI, l'élève cherche à répondre à un problème posé à la classe, en le reformulant, en faisant des hypothèses. Il met en place des expériences pour tester les hypothèses. Les résultats obtenus sont ensuite analysés, l'hypothèse est validée ou infirmée. L'activité de l'élève est alors centrée sur le « comment faire », en programmant les tâches à effectuer pour tester l'hypothèse (Morge & Boilevin, 2007). La DI ou l'enquête de Dewey se présentent, toutes deux, avec une démarche de mises à l'épreuve successives : si l'hypothèse n'est pas validée, l'investigation est réactivée. La logique de Dewey propose des outils pour contrôler l'enquête et la formulation d'hypothèses par les élèves, l'essentiel de la connaissance cependant provient de l'expérimentation. Ce cadre empirico-inductiviste, à la différence d'un cadre rationaliste bachelardien, ne permet pas une analyse d'obstacles épistémologiques rencontrés par les élèves, obstacles qui limiteraient nécessairement la production de certaines hypothèses.

2.3. Regards croisés entre la DI et le modèle « investigation-structuration »

Dans les années soixante-dix et quatre-vingt, le modèle pédagogique « investigation-structuration » prend en compte à la fois les activités d'investigation, de résolution de problème et de structuration de connaissances (Host *et al.*, 1971-1980 ; Astolfi *et al.*, 1997).

Dans ce modèle pédagogique, les activités fonctionnelles, au sens d'actes à accomplir (s'occuper d'un élevage, réaliser semis et plantations...), sont mises en avant pour faire émerger un problème face aux difficultés rencontrées. La résolution du problème s'appuie sur des activités d'investigation et des opérations logiques (séparer, relier, modéliser, etc.) pour permettre à l'élève de se représenter

le réel. Quant à la structuration, elle repose sur les activités organisées par le maître, à partir des acquis de la résolution du problème. Le maître propose des activités de confrontation, de comparaison, de réinvestissement, de généralisation, pour aider l'élève à intégrer le savoir construit lors de la résolution de problème à un champ conceptuel (Vergnaud, 1990). La structuration n'est donc pas un bilan ou une synthèse, mais souvent une mise en relation avec d'autres concepts, permettant d'étendre le champ de validité d'un acquis ponctuel.

On retrouve ainsi des points communs entre la démarche d'investigation et le modèle investigation-structuration : une nécessité de mener des activités d'investigation pour interroger le réel, par exemple. On constate aussi des différences quant à la prise en compte des obstacles ou sur la structuration. Dans le modèle investigation-structuration, l'objectivation du savoir résulte d'un processus de décentration organisé sur des activités de dépassement des conceptions des élèves et des obstacles rencontrés. Dans ce modèle, le problème naît d'une contradiction de points de vue ou de la rencontre avec un obstacle, et l'investigation conduit à l'élaboration d'un référent empirique (Martinand, 1986). La mise en relation entre un référent empirique et une élaboration intellectuelle ou la construction de concept ne se fait pas spontanément. Elle nécessite des tâches de représentation, des démarches de modélisation du réel en relation avec un cadre théorique donné. Aussi, les activités expérimentales d'investigation ne conduisent pas, d'emblée, à une séparation des données subjectives et objectives. Ce sont plutôt les activités de résolution de problème et de structuration qui aident à cette séparation.

Avec la DI, ce sont des logiques apparentes soit d'investigation, soit d'illustration, dans le déroulement d'un curriculum plus ou moins ouvert (école primaire) ou, le plus souvent, fermé (disciplines scientifiques dans le secondaire), qui sont mises en tension. Une logique qualifiée ici d'apparente car l'analyse d'activités scolaires, se présentant comme d'investigation, montre que celles-ci restent néanmoins, le plus souvent et fondamentalement, au service de l'illustration d'un contenu conceptuel (Bomchil & Darley, 1998).

La gestion des obstacles n'est pas ici convoquée. Les résultats expérimentaux, obtenus lors de l'investigation, semblent suffire à construire une modélisation du réel. Ainsi, la DI s'inscrit dans un cadre empirico-inductiviste où de l'expérience naît la connaissance.

3. Interrogations épistémologiques des activités d'investigation en biologie

La démarche pédagogique nommée actuellement par investigation s'appuie sur une considération ancienne : donner à l'élève, sous une forme ou sous une autre, une part active dans la construction du savoir, en s'appuyant sur son activité propre. En fait, ce principe, énoncé de manière générale, est assez largement admis.

Les difficultés et les débats commencent au niveau des exemples concrets qui relèvent parfois d'un idéalisme inopérant ou d'une épistémologie empirique.

Comment structurer, unifier, intégrer les acquis des investigations qui sont nécessairement fragmentaires, partiels, dispersés ? Comment gérer le concept d'obstacle épistémologique, introduit par Bachelard, obstacles qui impliquent une rupture dans l'appropriation ? Quel type de problème est posé ? Un problème pratique, bien souvent ponctuel et isolé, ou un problème théorique intégré dans une problématique plus large ? Quelles relations y a-t-il entre faire et connaître ? Le travail effectué par l'élève permet-il une relance de la recherche, une dynamique ? Présente-t-il un caractère heuristique ?

3.1. Unifier ou distinguer ? Réduire ou spécifier ?

La DI peut-elle être appréhendée quel que soit le domaine d'étude ? S'agit-il d'unifier – au risque de réduire – ou de permettre aussi de distinguer et de spécifier ? Nous nous appuyons sur l'investigation du vivant à l'école pour montrer une nécessité de protocoles et de méthodologies souvent spécifiques.

L'investigation expérimentale dans la découverte du vivant à l'école élémentaire n'est possible que sur quelques sujets d'étude, en particulier la biologie végétale (la germination, l'eau et les plantes), le développement et le comportement des animaux, les études de milieu (terrarium, aquarium) et les manifestations physiologiques du fonctionnement de son propre corps. Elle incite les élèves à être imaginatifs et ingénieux, pour concevoir et réaliser les dispositifs, patients car les résultats sont rarement immédiats.

Ce sont les végétaux qui demeurent souvent les plus accessibles pour cette approche, avec un questionnement relatif à la germination, au développement des végétaux, ou concernant la plante et l'eau. Une investigation expérimentale, parmi les plus pratiquées, concerne la recherche des facteurs intervenant dans la germination. Les facteurs (nommés facteurs abiotiques en écologie) classiquement étudiés sont : l'eau, la température, l'air et la lumière. Ce genre d'investigation expérimentale, qui semble idéale du fait de sa simplicité et qui nécessite des protocoles expérimentaux qui ressemblent à ceux pratiqués en sciences physiques, n'est pourtant pas sans réserver quelques surprises ! Ainsi, certains semis de graines, mis dans un placard pour une recherche d'obscurité, produisent des germes blanchâtres, mais d'une longueur démesurée. D'autres graines ne germent pas à température ordinaire tandis que celles placées au réfrigérateur laissent pointer vaillamment leurs racines. En effet, la situation réduite à une simple recherche de facteurs néglige, d'une part, le fait qu'il s'agit de facteurs limitants et non de stricte

causalité, d'autre part, un grand nombre de facteurs dits biotiques et caractéristiques du vivant⁷.

La séparation de variables impose, le plus souvent, la réalisation d'un montage expérimental. Dans une démarche de résolution de problème, seul un détour par l'analyse du système permet d'imaginer les hypothèses possibles qui seront mises à l'épreuve dans un dispositif construit et contrôlé. Cependant, dans l'investigation expérimentale du vivant, la séparation de facteurs reste souvent difficile, voire impossible. L'élève expérimentateur est confronté, simultanément, à des facteurs biotiques et abiotiques, souvent en interaction.

Solomon (1994) analyse que la démarche de séparation de variables contrôlées, développée dans les modules *Science Curriculum Investigation*, non seulement ne convient pas aux investigations de biologie mais développe, chez les élèves, une image de méthodologie scientifique stéréotypée. En conséquence, ils seraient incapables, par la suite, de reconnaître ce qui, dans ce module, pourrait relever du domaine de l'investigation du vivant. Solomon (*ibid.*) constate, en outre, qu'une étude, très classique, comme celle des facteurs influençant l'activité de l'amylase salivaire est considérée, par la majorité des élèves, comme relevant de la chimie. Par exemple : quels sont les conditions et les lieux d'action de la salive dans l'organisme humain ? Est-ce un questionnement biologique ou plutôt une interrogation uniquement chimique⁸, relative à la cinétique d'une réaction enzymatique ?

La théorisation biologique n'est pas que légaliste et les activités scolaires expérimentales mettent en avant essentiellement un paradigme bernardien d'expériences comparatives, fondé sur la relation « une cause égale un effet », un protocole du type présence ou absence de la cause, et la nécessité de témoin. Ce paradigme ne permet cependant pas d'envisager des causalités plurifactorielles, pour lesquelles des protocoles de type covariations, approche statistique et modélisation sont nécessaires. Les investigations du vivant ne sont pas toutes analytiques et les approches systémiques, avec recueil et traitement de données, associées à des démarches de modélisation sont fréquentes⁹. Dans les situations biologiques, l'expérimentateur est le plus souvent confronté à des causalités plurifactorielles ou à des facteurs en interaction, pour lesquels il doit renoncer à tout maîtriser (Coquidé, 2000).

3.2. Problème, investigation et obstacle

L'introduction de l'investigation en milieu scolaire semble venir d'un constat apparemment simple : l'investigation qui instruit le scientifique ne peut-elle pas

7 Comme, par exemple, l'existence de mécanismes très subtils de régulation, telle la nécessité du froid pour lever la dormance des graines de certaines espèces.

8 Voir aussi Hrairi (2004).

9 Par exemple, lors du recours à la modélisation en compartiments, en écologie ou en biologie cellulaire, voir Orange (1997).

aussi instruire l'élève ? Mais les élèves et les enseignants sont en bout de chaîne, n'ayant à leur disposition qu'un savoir général, désincarné et coupé de sa base problématique. Toute l'activité du scientifique, toute la démarche y est généralement gommée. Il ne reste que des résultats, des explications à des problèmes qu'ils ne se sont jamais posés. On n'apprend donc pas aux élèves à « faire de la science », à appréhender la « nature de la science ». On leur apprend, le plus souvent, les résultats de la science. Dans la démarche d'investigation et avec un curriculum fermé, c'est le savoir à enseigner qui pilote, à l'opposé de ce qu'exigerait une authentique démarche investigatrice. Dans un curriculum plus ouvert, permettre aux élèves de « vivre l'expérience » d'une démarche d'investigation, prenant appui sur des pratiques sociales de référence partagées, est possible. Faute de ressources bibliographiques adaptées, elles se développent cependant rarement à l'école. Prenons, par exemple, le problème pratique de la conservation des fleurs : « *on a des fleurs coupées, on veut trouver un moyen de les faire durer plus longtemps* ». Il est possible d'inventorier l'ensemble des procédés proposés et de les mettre à l'épreuve : mettre de l'aspirine, mettre les plantes au frigo, mettre un peu d'eau de Javel, mettre une substance conservatrice, etc. De cette investigation, sans connaître les résultats à l'avance, on va trouver quelque chose : il y a des procédés favorables et d'autres défavorables. Une difficulté demeure cependant, dans l'analyse et dans l'interprétation des résultats : pour des raisons économiques et de concurrence, la composition chimique des produits ne peut être connue, et rien, dans la littérature, ne permet d'accéder à une explication scientifique.

L'exemple historique de Semmelweis rend compte d'une investigation menée par un scientifique. Cette histoire peut être écrite de trois manières différentes, en fonction des thèses épistémologiques auxquelles on adhère. Semmelweis, médecin hongrois travaillant à partir de 1844 à Vienne, dans le service du Dr Klein, tente de répondre à une question dramatique : pourquoi y a-t-il beaucoup plus de décès par fièvre puerpérale lors des accouchements dans ce service que dans le service voisin du même hôpital ?

1) Cette histoire est initialement écrite par Louis Ferdinand Céline¹⁰ qui y trouve les éléments qui formeront par la suite l'âme de sa littérature : la femme, le sang, l'accouchement, la mort, la putréfaction, le juif (Céline, 1924/1999). Julia Kristeva a analysé ce pathos, ce « *pouvoir de l'horreur* » (1980).

2) À l'inverse, Carl Hempel (1972) écrit un récit logique et méthodique, dans lequel le médecin étudie systématiquement une série d'hypothèses matérielles et immatérielles qu'il met à l'épreuve de tests expérimentaux statistiques. La dernière hypothèse tient au fait que les médecins du service entraient dans la salle d'accouchement après avoir fait des dissections et en s'étant lavé superficiellement les mains. Ces mains gardaient une odeur cadavérique caractéristique. Il demanda de

¹⁰ Dans sa thèse de doctorat en médecine : *La vie et l'œuvre de Philippe Ignace Semmelweis*. Céline L.-F. (1924/1999).

se laver avec du chlorure de chaux pour faire disparaître l'odeur et éviter la transmission de l'infection. La mortalité chuta fortement. La matière putride, la matière cadavérique transmet l'infection. L'histoire s'arrête là.

3) Ne faisons pas d'anachronisme ! Le mot infection dérive du mot « infect » et ne signifie pas à l'époque développement microbien, ce qu'il désigne actuellement pour nous. Nous sommes entre 1844 et 1848. Les travaux de Pasteur et le mot microbe (1878) sont bien postérieurs. Semmelweis doit surmonter, pour lui et pour son entourage, un obstacle bachelardien majeur : le médecin est au service de la vie et l'on est conduit à dire qu'il transmet la mort. Peut-on imaginer obstacle plus résistant ? Son hypothèse efficace (faire disparaître l'odeur) est très indirecte. Dans le contexte de l'époque, il examine aussi des hypothèses que nous rejetterions actuellement *a priori*, tel le trajet du prêtre apportant les sacrements de l'extrême-onction aux mourants. Son investigation est une réponse opératoire à une question précise, mais il n'ouvre pas un champ et un programme de recherche. Semmelweis n'est pas le précurseur de la découverte du concept de microbe. Il n'a pas démontré que cette fièvre n'était due qu'à la matière putride, ni analysé comment elle agirait, ce qu'elle contient.

L'exemple de la germination étudiée en classe et celui de l'histoire de Semmelweis montrent qu'il existe une spécificité des activités d'investigation et des obstacles épistémologiques à surmonter en sciences de la vie.

4. Deux exemples d'investigation en sciences de la vie

Nous analysons ici deux exemples – la classification phylogénétique et la ventilation – pour donner un contenu précis aux interrogations épistémologiques que nous venons de discuter.

4.1. Investigation et classification phylogénétique

• Les activités investigatrices conduites par les élèves

Généralement, la démarche d'investigation, en classe, vise à ne pas imposer aux élèves une classification *a priori*. Ainsi, les catégories – *Mammifère*, *Oiseau*, etc. – ne sont pas données à l'élève, mais reconstituées par lui, par regroupement des espèces qui possèdent les mêmes attributs (poils, mamelles, ailes, plumes, etc.).

Pour cela, les élèves observent, trient et créent des catégories. Ils observent, pour découvrir les attributs (pattes, plumes, antennes, etc.) caractéristiques des organismes. Ils trient pour séparer les organismes en fonction des attributs qu'ils possèdent. Ils classent, enfin, en regroupant les organismes dans des catégories hiérarchisées par le partage des attributs.

Pour classer les organismes, les élèves explorent différentes modalités de tri : sélectionner en fonction des attributs présents ou absents, ou bien encore combiner la présence de certains attributs et l'absence d'autres. Le classement consiste à organiser un inventaire de ce qui existe, à partir de modalités de tri. C'est à la fois une méthode d'inclusion et d'exclusion par répartition des organismes dans différentes catégories. Par exemple, l'élève regroupe tous les animaux qui présentent des écailles, des nageoires, des ouïes et une forme en fuseau dans une même catégorie *Poisson* ; il en exclut tous ceux qui ne possèdent pas ces attributs. En résumé, à partir de l'observation et de la sélection des attributs, l'investigation conduit à une classification. Mais quelle classification ?

• **Le maître contrôle l'investigation**

L'investigation conduite par les élèves n'est pas tout azimut, mais préorientée par le choix des attributs et des espèces. De fait, l'enseignant oriente la classification réalisée par les élèves dans un cadre théorique donné, celui de la théorie de l'évolution, mais sans explicitement le dire aux élèves. Tout autre classement est alors exclu, que ce soit une clé de détermination, une classification non hiérarchique ou une classification hiérarchique non-phylogénétique.

Aussi la classification obtenue par les élèves repose sur des conditions de possibilité : il faut choisir des formes stabilisées de l'espèce, une polarité des caractères et de l'espèce représentative des catégories. C'est pourquoi l'enseignant prend soin, préalablement, de choisir les attributs et les espèces étudiés pour éviter aux élèves d'explorer d'autres pistes possibles. Par exemple, il ne propose pas de classer un stade de développement d'un organisme avant métamorphose. Comment, en effet, classer la chenille comparée au papillon, ou le têtard comparé à la grenouille, quand les attributs ne sont pas les mêmes avant et après la métamorphose (absence/présence d'ailes, absence/présence de pattes, etc.) ?

De même, le maître ne propose pas, dans une collection d'espèces caractérisées par l'attribut *poil*, d'y intégrer le *Dauphin*, sachant que l'attribut *poil* y est absent. Sans quoi l'élève pourrait ne pas regrouper le *Dauphin* dans les animaux *sans poils* et l'exclure de la catégorie *animaux à poils*. Auquel cas, l'enseignant devrait expliquer à l'élève que, si le *Dauphin* n'a pas de poils, c'est qu'au cours de l'histoire évolutive, il les a perdus. Ainsi, malgré son absence de poils, le *Dauphin* est regroupé avec les *Mammifères*, en raison d'autres attributs partagés (mamelles, etc.) et en souvenir des poils disparus.

Autre exemple : l'attribut aile permet-il de regrouper dans une même catégorie le merle et la chauve-souris ? Ce caractère est homologue pour les deux espèces : même origine embryonnaire, mêmes structures osseuses, même fonction. Mais l'aile de l'oiseau et celle de la chauve-souris, bien qu'homologues, ont été acquises indépendamment au cours de l'histoire évolutive des deux espèces. Il s'agit-là d'une convergence adaptative où l'attribut aile est apparu au moins deux fois dans l'évo-

lution. Ce que l'élève ne peut découvrir seul, uniquement par la manipulation des attributs. On pourrait, ainsi, multiplier les exemples pour montrer que l'investigation menée par les élèves, en particulier à l'école primaire et au collège, se fait à partir de paramètres contrôlés par l'enseignant (espèces et attributs) (Orange-Ravachol & Ribault, 2006). Les obstacles épistémologiques de la métamorphose (même espèce avec des attributs différents selon le stade de développement) et de la convergence (différentes espèces avec les mêmes attributs) sont ainsi, provisoirement, gommés pour orienter vers la classification attendue par le maître : une classification phylogénétique.

• **La démarche d'investigation s'inscrit dans un cadre théorique donné**

Le contrôle des paramètres rappelle que toute classification s'inscrit dans un cadre explicatif donné, lequel guide les choix méthodologiques.

Ainsi, les classifications non-scientifiques répondent à des problèmes liés aux activités humaines : lutter contre les ravageurs des cultures, se soigner, etc. Ces classifications séparent alors les animaux nuisibles des non-nuisibles, les plantes curatives des plantes toxiques, etc. Elles construisent des catégories en fonction des besoins humains. Les classifications préscientifiques, dès l'Antiquité, ont séparé les organismes en fonction de deux critères : les attributs présents et absents pour décrire « l'ordre de la nature »¹¹. Au XVIII^e siècle, la classification linnéenne, avec l'introduction du principe de subordination des caractères, devient hiérarchique par emboîtement des catégories : la classe, la famille, l'ordre, le genre, l'espèce. Aujourd'hui, la classification phylogénétique, c'est-à-dire une classification qui met en évidence le degré de parenté entre les espèces, répond à un problème déjà posé par Lamarck et Darwin : comment la classification peut-elle rendre compte de la transformation des espèces au cours des temps géologiques ?

Hennig (1966) a proposé deux critères de classification pour répondre à ce problème : l'homologie et la polarisation des caractères. L'homologie est caractérisée par une même structure anatomique, une même origine embryonnaire et une même fonction des attributs chez différentes espèces. La polarisation des caractères permet de distinguer un état primitif (acquis anciennement) et un état dérivé (acquis plus récemment), pour suivre la transformation du caractère au cours de son histoire évolutive. L'exemple du dipneuste, comme plus proche de la vache que du saumon, en est une bonne illustration. Malgré une très forte ressemblance morphologique avec le saumon (forme en fuseau, écailles, nageoires, etc.), le dipneuste partage avec la vache des caractères à l'état dérivé : narines internes et présence de poumons. En conséquence, dans la classification phylogénétique, le dipneuste est plus proche de la vache que du saumon.

Ainsi, la classification phylogénétique non seulement rectifie la classification linnéenne, mais elle la fait partiellement éclater. Par exemple, le groupe *Reptile* a

11 Vertébrés/invertébrés ; ailés/apteres ; ovipares/vivipares ; etc.

disparu des classifications modernes. Cette disparition est le produit de la méthode de la polarisation des caractères, méthode qui regroupe dans une même catégorie les espèces qui partagent des caractères à l'état dérivé. Les *Crocodiles* malgré une apparence proche de celle des *Lézards* (forme du corps, présence d'écailles, etc.) partagent des caractères homologues à l'état dérivé avec les *Oiseaux* (exemple : cloisonnement du cœur en quatre parties, mandibules fenêtrées, etc.) qu'ils ne partagent pas avec les *Tortues*, *Lézards*, et *Serpents*. Concrètement, cela signifie que les *Crocodiles* sont plus proches des *Oiseaux* qu'ils ne le sont des *Lézards*. Dans la classification phylogénétique, *Crocodiles* et *Oiseaux* forment un clade. Cette nouvelle catégorie permet de distinguer les groupes monophylétiques (partage des états dérivés), des groupes paraphylétiques (partage des états primitifs) ou des groupes polyphylétiques (partage de caractères convergents).

Autre exemple de disparition d'un groupe, celui des *Poissons*. Là aussi, la classification moderne a fait éclater ce groupe en mettant en évidence que les actinoptérygiens (vertébrés osseux à nageoires rayonnées comme la truite, la perche, le maquereau, etc.) sont plus proches des tétrapodes qu'ils ne le sont des vertébrés cartilagineux : chondrichthyens (requins ou raies) ou les pétromyzontides (lamproies).

La technique classificatoire par polarisation des caractères permet ainsi d'établir des degrés de parenté alors insoupçonnés (exemple : *Crocodiles/Oiseaux* ou dipneuste/vache). Elle a aussi une portée heuristique puisqu'elle permet de relancer la problématique de l'organisation du vivant *via* son histoire évolutive.

Dans ce contexte, l'investigation permet aux élèves de construire des catégories emboîtées par regroupement d'attributs partagés. Ce qui, en soi, est déjà un objectif pédagogique et didactique. Ce résultat ne dit cependant rien du degré de parenté entre espèces, si ce n'est comme hypothèse, mais une hypothèse qui ne peut pas être testée par l'investigation des élèves, en l'absence du cadre théorique de l'évolution.

• **Le passage des groupes emboîtés à la phylogénie :**
l'obstacle de la généalogie

Le classement répond d'abord à un problème pratique d'ordonnement du vivant. En ce sens, la classification phylogénétique a un triple objectif : inventorier les attributs, polariser les attributs et les classer pour déterminer, rétroactivement, des relations de parenté entre les espèces.

Mais le passage de la constitution des groupes emboîtés à la phylogénie nécessite un changement de posture épistémologique : passer de la manipulation empirique des attributs à une modélisation de l'histoire du vivant. De ce point de vue, la construction d'une classification phylogénétique constitue une investigation des relations possibles entre l'organisation et l'histoire du vivant. L'objectif de l'investigation n'est donc pas, ici, de collecter des observables, mais bien d'aider à la

conceptualisation de la transformation des espèces. La classification devient alors un outil pour appréhender la diversité du vivant en termes d'unité et de relations évolutives.

Or l'investigation, conduite en classe, porte généralement sur l'organisation du vivant par construction de catégories emboîtées, sans lien avec l'histoire du vivant. Comment alors passer de la spatialité des ensembles emboîtés (la diversité) à la temporalité d'une ascendance commune des espèces (l'unité) ? La classification par emboîtement ne permet pas, en effet, à l'élève de redécouvrir empiriquement un lien de parenté entre les espèces. L'intuition de la parenté entre espèces à partir de la ressemblance est ici un obstacle difficile à surmonter. En effet, la généalogie est un visible immédiatement accessible aux élèves par identification des parents, grands-parents, cousins, etc., tandis que la phylogénie est une modélisation de l'histoire du vivant. Passer de l'horizontalité des ensembles emboîtés à la verticalité, par enracinement de l'ancêtre commun, c'est faire l'expérience de la biodiversité comme problème théorique de l'histoire du vivant, et pas uniquement comme problème pratique de manipulation d'attributs. En ce sens, la classification phylogénétique n'est pas une généalogie, mais un objet épistémique et méthodologique de reconstitution de la transformation des espèces : épistémique car elle permet de raisonner en termes de parenté des espèces, et méthodologique car elle renseigne sur le degré de parenté entre les espèces.

Par conséquent, la classification est une représentation symbolique des relations de parenté et non de descendance, contrairement à la généalogie. Elle n'identifie pas l'ancêtre commun, mais indique l'état dérivé des caractères hérités à partir d'un ancêtre commun. Ainsi, pour établir des degrés de parenté entre les espèces, il faut préalablement disposer du cadre théorique de l'évolution pour construire, par investigation, une classification qui teste la validité de l'hypothèse des liens de parenté.

Mais toute classification est aussi une convention, fondée sur la rationalité des arguments et sur des choix pas toujours objectivés. Ainsi, placer l'*Homme* dans la classification fait l'objet de résistance, même dans la communauté scientifique. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la classification linnéenne classait, l'*Homme* dans le genre *Homo*, le distinguant ainsi du groupe *Orang-outan*, *Gorille* et *Chimpanzé*. À partir des années soixante, la classification phylogénétique met en évidence une très forte proximité moléculaire entre le *Chimpanzé* et l'*Homme*. Dans les années soixante-dix et quatre-vingts, cette parenté étroite entre l'*Homme* et le *Chimpanzé* est confirmée, au point que certains scientifiques (Goodman et al., 1998 ; Page & Goodman, 2001) choisissent de regrouper dans le même genre *Homo* les deux espèces : *Homo Pan* pour le *Chimpanzé* et *Homo Homo* pour l'*Homme*, considérant qu'il n'y a pas plus de différences entre *Homme* et *Chimpanzé* qu'il y en a entre la *Panthere*, le *Tigre* ou le *Lion* réunis, tous les trois, dans le même genre *Panthera*. Mais ce choix scientifiquement légitime remet culturellement en cause la place de

l'Homme dans la nature. Si le *Chimpanzé* et *l'Homme* sont regroupés dans un même genre, la spécificité biologique de l'humain s'en trouve réduite et *l'Homme* n'appartient plus à une catégorie singulière. C'est peut-être une des raisons pour lesquelles cette classification n'est jamais proposée dans les manuels scolaires, d'autant qu'elle impliquerait aussi de modifier la terminologie utilisée dans la lignée humaine (*Australopitèque*, *H. habilis*, *H. erectus*, *H. sapiens*, etc.).

En résumé, la démarche d'investigation s'apparente, souvent, à une « pseudo-redécouverte » de la phylogénie, en gommant les tâtonnements, les impasses et les obstacles épistémologiques et culturels. Or, dépasser ces obstacles et rompre avec les conceptions communes est aussi un enjeu de l'investigation. Dans ce cas, la démarche d'investigation ne doit pas porter uniquement sur la manipulation d'attributs, mais aussi sur la fixité des espèces, pour tester ensuite l'hypothèse d'une transformation et celle d'un possible lien de parenté entre les espèces.

4.2. Investigation de la ventilation pulmonaire : obstacle et condition de possibilité

• À quoi sert la ventilation ?

Une investigation de la respiration animale, à l'école primaire et au collège, commence souvent par utiliser le mot ventilation sauf à l'écarter, comme nous allons le montrer, la réponse dans la question.

L'existence d'une ventilation chez les animaux vertébrés terrestres et aériens, appuyée également sur notre propre vécu humain, relève du constat immédiat. Aspirer, souffler ou, plus scientifiquement, inspirer, expirer. On peut décrire ce phénomène en termes de rythme variable en fonction de l'effort, de volume brassé, de mécanisme musculaire assurant la ventilation, c'est-à-dire l'entrée et la sortie de l'air par la bouche (ou le nez) et son aller et retour aux poumons. On peut se représenter les poumons à l'aide d'une radiographie ou d'une dissection (dans des situations autorisées). Ce double mouvement ne signifie pas *a priori* échanges gazeux. Il est à ce propos utile de rectifier une erreur fréquente concernant la façon de ventiler. C'est le diaphragme, muscle dont on ignore l'existence et dont on ne se fait pas de représentation, qui assure couramment l'essentiel de cette ventilation. Les adeptes du Yoga, du chant choral, les femmes qui ont accouché, le savent car ils ont appris à contrôler les mouvements respiratoires.

Des exercices scolaires sur son propre corps, en SVT ou en EPS, pourraient développer ce travail de rectification. Respirer s'apprend et n'est pas spontané. Soulever les épaules et rentrer le ventre pour inspirer est aussi une erreur apprise par la gymnastique dite « suédoise ».

Mais il se pose le problème de l'explication de ce phénomène. À quoi sert-il ? Si l'on se propose d'utiliser cette observation comme accès aux mécanismes biochimiques d'oxydoréduction et de production de « chaleur », sinon d'énergie,

on se heurte ici à un obstacle inaperçu, ce qui est le cas de nombreux obstacles en biologie. On ne passe pas sans rupture de ventilation à source d'énergie. L'obstacle est inaperçu car le même mot de respiration désigne les phénomènes de ventilation, observés et nommés par les Grecs, et les phénomènes d'oxydoréduction étudiés initialement par Lavoisier en 1777 (Gotlieb, 1964). Ce même mot donne l'illusion de la continuité d'un même problème et induit faussement la possibilité de passer pédagogiquement de manière continue, c'est-à-dire sans rupture, de la ventilation à la biochimie des oxydoréductions. Bien évidemment, une fois le mécanisme expliqué, la ventilation devient la manifestation des phénomènes biochimiques et peut donner accès, de manière non invasive, à l'analyse de ses modulations lors d'expérimentations en fonction de divers facteurs. Mais, cette fois, nous observons *a posteriori* en connaissance de cause et non pas *a priori*.

Dans un autre domaine, la création du mot photosynthèse à la fin du XIX^e siècle marque nettement un avant et un après l'explication scientifique. Aucun mot ne désignait ce phénomène car il n'y avait rien à observer spontanément. En utilisant la continuité de la respiration-ventilation-oxydoréduction, le pédagogue place donc l'élève sur un chemin finalisé en sous-main par l'accès à l'explication, sans pouvoir lui dire, ni définir un problème dont la respiration conçue comme oxydoréduction serait la réponse.

Pour mieux éprouver cette difficulté, on peut s'aider de l'étymologie du mot respiration, de la mythologie, de l'histoire des sciences, de la psychanalyse pour découvrir d'autres regards possibles sur ce phénomène de ventilation-respiration-oxydoréduction. Ceci peut également aider à lire certaines des propositions formulées par les élèves au cours de leurs investigations documentaires et de leurs observations. La ventilation peut être conçue comme une réfrigération, ce qu'est effectivement le halètement du chien. Le souffle est intimement lié à la vie et donc difficilement séparable de celle-ci. Du premier cri, à la naissance, au dernier souffle, au moment de la mort, en passant par l'odorat, l'âme (*anima*, *anemo* le vent) et Dieu (*spiritus*, l'esprit).

Le souffle est donc à regarder comme le signe de la vie, le symbole de la vie, une propriété de la vie. Reste à définir ces trois termes de signe, symbole, propriétés qui ne signifient pas fonction physiologique et ne constituent pas une explication scientifique. Repérer des propriétés, c'est déjà plus qu'une description, mais ce n'est pas encore une explication. L'investigation sur la ventilation se prolonge donc « naturellement » vers une autre question qui est celle de la définition de la vie.

- **Une rupture : la chaleur animale**

La question que se pose Lavoisier n'est pas « à quoi sert la ventilation » mais « quelle est l'origine de la chaleur animale » ? (Mendelsohn, 1960). Bien évidemment, la reconnaissance de cette ventilation et, plus précisément, l'existence d'un échange

gazeux au niveau des poumons reste une condition de possibilité de la compréhension du rôle des oxydoréductions. De même, la connaissance d'une circulation sanguine est un préalable pour comprendre le transport d'oxygène. Le physicien, ou plutôt le chimiste, rencontre un autre obstacle : celui de l'existence d'une pluralité de formes de l'énergie et donc des possibilités de conversion des diverses formes les unes dans les autres (Canguilhem, 1963). Cette question de l'origine de la chaleur animale n'est pas spontanée car les élèves n'ont pas conscience de produire de la chaleur. Un travail serait donc à faire en amont sur cette question. Comment analyser le fait que le corps des *Mammifères* et des *Oiseaux* produit de la chaleur et en perd en permanence, ce qui lui permet de maintenir une température constante, si le bilan production/pertes est équilibré ?

Ce problème énergétique qui s'inscrit dans une problématique physique plus large est en rupture totale avec le phénomène de ventilation. Claude Bernard nous a avertis : ce n'est pas en se demandant à quoi sert tel organe – le foie par exemple – que l'on découvre sa fonction. On ne va pas de l'anatomie à la physiologie qui ne serait alors qu'une anatomie animée. Il faut dissocier anatomie et fonction physiologique. Le problème des sources de la chaleur animale est une autre investigation. Elle s'oriente vers la recherche et la mise en relation des échanges gazeux avec les phénomènes de combustion. On recherche alors parfois la présence (erronée) d'un foyer et d'une flamme (Canguilhem, 1955). D'un autre côté, s'ouvre la question de la valeur énergétique des aliments... la parole est alors au chimiste. Voilà deux, et même trois investigations, dont il faut rétablir l'ordre pédagogique, qui est aussi l'ordre de conditionnement cognitif. Cela devrait donc aussi conditionner l'ordre des investigations des élèves.

À partir de ces deux exemples (clé de détermination/classification phylogénétique, ventilation/source de chaleur), nous voyons qu'une investigation spontanée peut conduire à différentes pistes qui ne sont pas nécessairement en continuité, mais en rupture avec l'investigation guidée par le maître.

5. Conclusion

Une investigation qui serait réduite à des procédés de construction des savoirs et à un entraînement à certains types de raisonnement et de construction des savoirs, évite d'avoir à trancher entre des options difficiles et permet de combiner pragmatiquement des contraintes scolaires multiples, dont celle du temps n'est pas la moindre.

Cependant, dans les sciences de la nature, et particulièrement dans les sciences de la vie, il est difficile de forger des situations qui laissent à la fois aux élèves une liberté de pensée et garantissent, par elles-mêmes, le point d'arrivée. La situation doit intégrer le caractère flexible de ce qui est proposé aux élèves et les aspects adaptatifs du dispositif. Que doit construire l'enseignant *a priori* ? Que doit-il

introduire en fonction de l'activité réelle des élèves ? Les réponses à ces différentes questions relèvent en particulier de l'articulation de savoirs et de méthodes provenant de plusieurs disciplines.

Comment, par ailleurs, reprendre les interrogations épistémologiques que nous avançons pour envisager les intérêts et les limites de l'investigation, tout en permettant aux élèves d'expérimenter quelques investigations scientifiques dans leur scolarité ? ■

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON R.D. (2002). Reforming Science Teaching: What research says about inquiry. *Journal of Science Teacher Education*, n° 13, p. 1-12.
- ANDERSON R. (2007). Inquiry as an Organizing Theme for Science Curricula. In S. Abell & N.G. Lederman (éd.). *Handbook of Research in Science*. Londres : Laurence Erlbaum Associates Publisher, p. 807-830.
- AMIEUX A. (1912). Leçons de chose aux États-Unis. *Union des naturalistes*, n° 1, p. 7-13.
- ASTOLFI J.-P., DAROT E., GINSBURGER-VOGEL Y. & TOUSSAINT J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies*. Bruxelles : De Boeck.
- BALPE C. (2001). *Enseigner la physique. Approche historique au collège et au lycée*. Rennes : PUR.
- BOMCHIL S. & DARLEY B. (1998). L'enseignement des sciences expérimentales est-il vraiment inductiviste ? *Aster*, n° 26, p. 85-108. Disponible sur Internet : <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/8552> (consulté le 24 octobre 2009).
- BRUNER J. S. (1961). The act of discovery. *Harvard Educational Review*, n° 31, vol. 1, p. 21-32.
- CANGUILHEM G. (1955). *L'âme ignée*. In *Histoire du concept de réflexe au XVII^e et XVIII^e siècle*. Paris : Vrin, p. 79-88.
- CANGUILHEM G. (1963). *La bioénergétique*. In *Introduction au tome I du traité de physiologie de C. Kayser*. Paris : Flammarion.
- CÉLINE L.-F. (1924/1999). *Semmelweis*. Paris : Gallimard.
- COQUIDÉ M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant*. Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, université Paris-sud-Orsay, Orsay.
- DEAN D., DEAN JR. & KUHN D. (2006). Direct instruction vs. discovery: The long view. *Science Education*, vol. 91, n° 3, p. 384-397.
- DELEDALLE G. (1993). Présentation. In J. Dewey. *Logique. La théorie de l'enquête*. Paris : PUF, p. 9-50.
- DELEDALLE G. (1995). *John Dewey*. Paris : PUF.
- DEWEY J. (1913). *L'école et l'enfant*. Neuchâtel : Paris : Delachaux & Niestlé.
- DEWEY J. (1916/1975). *Démocratie et éducation*. Paris : Armand Colin.
- DEWEY J. (1938/1993). *Logique. La théorie de l'enquête*. Paris : PUF.
- DUGGAN S. & GOTT R. (1995). The place of investigations in practical work in the UK National Curriculum for Science. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 2, p. 137-147.

- GIBSON H.L. & CHASE C. (2002). Longitudinal impact of an inquiry-based science program on middle school students' attitudes toward science. *Science Education*, n° 86, p. 693-705.
- GOHAU G. (2002). Redécouverte d'hier et d'aujourd'hui. In N. Hulin (éd.). *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902*. Villeneuve-d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion, p. 167-181.
- GOODMAN M., PORTER C.A., CZELUSNIAK J., PAGE S.L., SCHNEIDER H., SHOSHANI J., GUNNELL G. & GROVES CP. (1998). Toward a phylogenetic classification of Primates based on DNA evidence complemented by fossil evidence. *Mol. Phyl. Evol.*, vol. 9, n° 3, p. 585-598.
- GOTLIEB L.S. (1964). *A history of respiration*. Springfield Ill. Thomas.
- HAMELINE D., JORNOD A. & BELKAÏD M. (1995) *L'école active. Textes fondateurs*. Paris : PUF.
- HEMPEL C.G. (1972). *Éléments d'épistémologie*. Paris : Armand Colin.
- HENNIG W. (1966). *Phylogenetic Systematics*. Univ. Illinois Press.
- HENSON P. (2007). Le mouvement d'« étude de nature » (Nature Study) aux États-Unis : citoyens et science vers la fin du XIX^e siècle. In F. Charvolin, A. Micoud, & L.K. Nyhart (éd.). *Des sciences citoyennes ? La question de l'amateur dans les sciences naturalistes*. Paris : Éd. de l'Aube, p. 19-39.
- HMELO-SILVER C.E., DUNCAN G. & CHINN C.A. (2007). Scaffolding and Achievement in Problem-Based and Inquiry Learning : A Response to Kirschner, Sweller, and Clark (2006). *Educational Psychologist*, vol. 42, n° 2, p. 99-107.
- HOST V. & MARTINAND J.-L. (éd.) (1975). Activités d'éveil scientifiques 3 : Initiation physique et technologique. *Recherches pédagogiques*, n° 74.
- HOST V., DEUNFF J. & DEMAN C. (éd.) (1976). Activités d'éveil scientifiques 4 : Initiation biologique. *Recherches pédagogiques*, n° 86.
- HRAIRI S. (2004). *Formes et fonctions des expériences dans l'enseignement de la biologie : cas de la digestion dans le curriculum tunisien*. Thèse de doctorat, ENS de Cachan, Cachan.
- JENKINS E. (1995). Central policy and teacher response ? Scientific investigation in the national curriculum of England and Wales. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 4, p. 471-480.
- KIRSCHNER P.A., SWELLER J. & CLARK R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: an analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, vol. 41, n° 2, p. 75-86.
- KRISTEVA J. (1980). *Pouvoirs de l'horreur. Essai sur l'abjection*. Paris : Éd. du Seuil.
- LEDERMAN J. S. & STEFANICH G. (2004). Addressing Disabilities in the Context of Inquiry and Nature of Science Instruction. In L. Flick & N.G. Lederman (éd.). *Scientific Inquiry and Nature of Science: Implications for Teaching, Learning, and Teacher Education*. Dordrecht (Pays-Bas) : Kluwer.
- LINN M.C., DAVIS E.A. & BELL P. (2004). *Internet environments for science Education*. Mahwah, NJ : Erlbaum.
- MATHÉ S., MÉHEUT M. & DE HOSSON C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, n° 32, p. 41-76.

- MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- MENDELSON E. (1960). *Heat and life: the development of theory of animal heat*. Cambridge, Mass : Harvard Univ. Press.
- MORGE L. & BOILEVIN J.-M. (dir.) (2007). *Séquences d'investigation en physique-chimie, recueil et analyse de séquences issues de la recherche en didactique des sciences*. Clermont-Ferrand : SCEREN-CRDP d'Auvergne.
- NOTT M. & WELLINGTON J. (1996). When the black box springs open: practical work in schools and the nature of science. *International Journal of Science Education*, n° 7, p. 807-818.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- ORANGE-RAVACHOL D. & RIBAUD A. (2006). Les classifications du vivant à l'école : former l'esprit scientifique ou inculquer la « bonne » solution ? À l'école des sciences, tome I. *Spécial Grand N*, p. 181-196.
- PAGE S.L. & GOODMAN M. (2001). Catarrhine phylogeny: noncoding DNA evidence for a diphyletic origin of the mangabeys and for a human-chimpanzee clade. *Mol. Phyl. Evol.*, vol. 18, n° 1, p. 14-25.
- SOLOMON J., DUVEEN J. & HALL S. (1994). What's happened to biology investigations? *Journal of Biological Education*, n° 28, p. 261-268.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactiques des mathématiques*, vol. 9, n° 3, p. 133-170.

TEXTES OFFICIELS (présentation chronologique)

- FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2000). Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. *BOÉN*, n° 23 du 15 juin 2000. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/bo/2000/23/ensel.htm>> (consulté le 24 octobre 2009).
- FRANCE : GROUPE TECHNIQUE ASSOCIÉ AU COMITÉ DE SUIVI DU PLAN DE RÉNOVATION DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE À L'ÉCOLE (2001). *Repères pour la mise en œuvre d'une démarche répondant au schéma : « Du questionnement à la connaissance en passant par l'expérience »*. Disponible sur Internet : <[http://eduscol.Éducation.fr/cid46578/reperes-pour-la-mise-en-œuvre-d-une-demarche- %A0du-questionnement-a-la-connaissance-en-passant-par-l-expérience %A0.html](http://eduscol.Éducation.fr/cid46578/reperes-pour-la-mise-en-œuvre-d-une-demarche-%A0du-questionnement-a-la-connaissance-en-passant-par-l-expérience-%A0.html)> (consulté le 24 octobre 2009).
- FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2002). Programmes d'enseignement de l'école primaire. *BOÉN hors-série*, n° 1 du 14 février 2002. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/bo/2002/hs1/default.htm>> (consulté le 24 octobre 2009).
- FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2005). Programmes de collège. *BOÉN hors-série*, n° 5 du 25 août 2005. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/bo/2005/hs5/default.htm>> (consulté le 24 octobre 2009).
- FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2006). *Décret n° 2006-830 du 11 juillet 2006 relatif au socle commun de connaissances et de compétences et modifiant le code de l'éducation*. Disponible sur Internet : <<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000818367&dateTexte=>>> (consulté le 24 octobre 2009).

FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2008). Horaires et programmes d'enseignement de l'école primaire. *BOÉN hors-série*, n° 3 du 19 juin 2008. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/bo/2008/hs3/default.htm>> (consulté le 24 octobre 2009).

FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2008). Les programmes du collège. *BOÉN hors-série*, n° 6 du 28 août 2008. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/pid20484/special-n-6-du-28-aout-2008.html>> (consulté le 24 octobre 2009).

RAPPORTS

AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE (AAAS) (1993). *Benchmarks for scientific literacy : Project 2061*. New York : Oxford University Press.

BACH J.-F. (dir.) (2004). *Groupe de relecture des programmes du collège. Pôle des sciences*. Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche. Disponible sur Internet : <http://pedagogie.ac-amiens.fr/asso-udppc/IMG/pdf/Rapport_Bach.pdf> (consulté sur le 24 octobre 2009).

COLLECTIF (1972). *Activités scientifiques d'éveil (1972)*. INRDP : Foundation Nuffield.

HIGH LEVEL GROUP (2004). *Increasing human resources for science and technology in Europe. EC conference Europe needs more scientists*. Commission Européenne. Direction de la Recherche. Disponible sur Internet : <http://ec.europa.eu/research/conferences/2004/sciprof/index_en.html> (consulté le 24 octobre 2009).

INSPECTION GÉNÉRALE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (groupe SVT) (2007). *Mettre les élèves en activité au collège pour les former, les évaluer, les orienter*. France : ministère de l'Éducation nationale, rapport n° 2007-031 de l'inspection générale. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/cid5103/mettre-les-eleves-en-activite-au-college-pour-les-former-les-evaluer-les-orienter.html>> (consulté le 24 octobre 2009).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996). *National science Éducation standards*. Washington D.C. : National Academy Press.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2000). *Inquiry and the national science Éducation standards: A guide for teaching and learning*. Washington, D.C. : National Academy Press.

PIETRYK G., ROBINE F., MARTIN P.-É. & MALLEUS P. (2006). *L'enseignement de la physique et de la chimie au collège*. France : ministère de l'Éducation nationale, rapport n° 2006-091 de l'inspection générale. Disponible sur Internet : <<http://www.Éducation.gouv.fr/cid4439/l-enseignement-de-la-physique-et-de-la-chimie-au-college.html>> (consulté le 24 octobre 2009).

ROCARD M., CSERMELY P., JORDE D., LENZEN D., WALBERG-HENRIKSSON H. & HEMMO V. (2007). *L'enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe*. Commission Européenne, Direction de la Recherche. Disponible sur Internet : <<http://www.inrp.fr/vst/Rapports/DetailÉtude.php ?id=674>> (consulté le 24 octobre 2009).

ROLLAND J.-M. (2006). *L'enseignement des disciplines scientifiques dans le primaire et le secondaire*. Commission des affaires culturelles, familiales et sociales. Assemblée nationale. Disponible sur Internet : <<http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-info/i3061.asp>> (consulté le 24 octobre 2009).