

La formation de l'esprit scientifique - trois axes théoriques, un outil pratique : DiPHTeRIC.

Jean-Yves CARIOU
Professeur de SVT à l'IUFM de Paris
cariou@paris.iufm.fr

“ Ce n'est pas le chemin qui est source et joie du voyage, mais le cheminement ”.
Caps, voies d'aventures 2001, F. Griot, guide de haute montagne.

“ On a dit quelque part que la vraie science devait être comparée à un plateau fleuri et délicieux sur lequel on ne pouvait arriver qu'après avoir gravi des pentes escarpées et s'être écorché les jambes à travers les ronces et les broussailles ”.

Claude Bernard (1865).

Une présentation de voies d'ascension possibles vers la difficile conquête de l'esprit scientifique, et d'un outil d'aide aux cordées d'élèves qui permette de concilier cheminement créatif et progression rigoureuse.

De l'école primaire au lycée, au-delà de la transmission des connaissances, la formation de l'esprit scientifique est l'une des missions essentielles de l'enseignement des sciences. L'acquisition d'une démarche rationnelle, objective et rigoureuse, jointe à la formation de l'esprit critique, arme les élèves de puissants instruments pour aborder des problèmes qui dépassent de beaucoup le seul cadre scientifique.

1. Équiper l'entendement

1.1. Les graines et les fruits

Claude Bernard insiste à plusieurs reprises sur les préceptes qui doivent guider “ l'esprit vraiment scientifique ” : le doute, la liberté d'esprit et d'initiative, la non-soumission à l'autorité des croyances. “ La méthode expérimentale est la méthode scientifique qui proclame la liberté de l'esprit et de la pensée. Elle secoue non seulement le joug philosophique et théologique, mais elle n'admet pas non plus d'autorité scientifique personnelle ”¹.

Pour lui, l'enseignement des sciences “ prépare un instrument intellectuel pour l'avenir (...). Il ne faut pas imaginer qu'on doit avoir en sortant des lycées des encyclopédistes. Il faut surtout apprendre à apprendre. (...) Il vaut mieux savoir moins et bien comprendre que de savoir beaucoup et ne pas comprendre ”², dit-il en se référant au Gargantua de Rabelais. D'où cet appel fort : “ Surtout il faut jeter en eux les germes de la science et non les fruits ”³.

¹ *Intro. = Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), Garnier-Flammarion 1966, p. 77.

² *Pcpes = Principes de médecine expérimentale* (rédigés de 1862 à 1877), PUF 1987, p. 216-218.

³ *Cahier de notes* (1850-60), Gallimard, 1965.

Jean Rostand poursuit : “ il va de soi que, par éducation, on n’entend pas seulement l’injection du savoir, mais aussi et peut-être surtout la saine formation de l’esprit. Plutôt que d’entasser dans les jeunes têtes des notions dont la plupart seront inutiles (...), il s’agit de créer en elles les conditions d’un jugement libre ; il s’agit d’enseigner l’humilité intellectuelle, l’aptitude au doute raisonné (...), le refus de toutes les superstitions et de toutes les magies ”⁴.

Pour Victor Host, pionnier de la didactique des sciences⁵, “ Un esprit scientifique se reconnaît d’une part à la curiosité, à la capacité de s’étonner devant tout fait que le savoir antérieur ne permettait pas de prévoir, d’autre part à la volonté de chercher une réponse au lieu de se contenter d’hypothèses non vérifiées. (...) L’absence de curiosité des grands élèves du second degré est le signe le plus certain de l’échec de l’enseignement scientifique ”.

On se rend également compte de cet échec dans les IUFM, où candidats aux concours de recrutement et jeunes enseignants s’initient à la pédagogie : ils devraient être, en tant qu’anciens élèves du Secondaire, de vieux routiers des démarches de résolution de problèmes scientifiques puisque c’est ce que préconisent les instructions officielles depuis plus de trente ans... C’est pourtant bien loin de ce que l’on constate, et ils peinent à retrouver la trace de concepts ou de mécanismes établis au terme d’investigations conçues et menées par leur classe dans le cadre de problèmes à résoudre.

On voit que sont à la fois reconnues les vertus de la formation de l’esprit scientifique, qui font que “ l’enseignement des sciences expérimentales jouit d’un prestige certain auprès des collègues des autres disciplines comme des parents d’élèves et de l’ensemble de la société ” (Astolfi, Peterfalvi et Vérin, 1998), et l’échec de cette formation et de l’acquisition d’une méthodologie scientifique.

1.2. Semer moins, mais mieux

S’il en est ainsi, c’est probablement que, comme chacun l’a constaté, les contraintes imposées aux enseignants sont multiples : programmes très denses, effectifs lourds, horaires serrés, inspecteurs sourcilleux sur la progression annuelle... Elles nous infléchissent vers les contenus, et même si les consignes (enseignement par problèmes, démarches explicatives) sont prises en compte, cela se traduit rarement, dans les faits, par des situations de recherche où ce sont réellement les élèves qui mènent les investigations. Du fait de ce sentiment, très compréhensible, d’être pris par le temps, c’est une progression mixte qui se trouve le plus souvent mise en place : un problème est inscrit au tableau, pour ensuite passer assez vite, avec plus ou moins d’initiative laissée aux élèves, aux activités prévues. Même si l’on est convaincu du bien-fondé de séquences dans lesquelles les élèves émettent diverses hypothèses et conçoivent eux-mêmes les moyens de les tester, l’idée est souvent présente qu’il s’agit d’un luxe qu’on ne peut s’offrir du fait de son excessive chronophagie.

Nous sommes bien obligés de faire avec les moyens du bord, menant de front dans le temps imparti objectifs de connaissances et formation méthodologique puisqu’aucun horaire n’est réellement prévu pour se consacrer à cette dernière en reléguant les contenus au second plan, comme nous y invitait plus ou moins, entre 1993 et 1999, feu l’option “ Sciences Expérimentales ” en 1^oS.

L’initiation des élèves à la démarche scientifique est souvent menée avec, présent à l’esprit des enseignants, le sigle “ OHERIC ”⁶, censé en résumer les étapes successives.

Lancée avec panache il y a un quart de siècle par André Giordan dans une vivifiante critique des pratiques pédagogiques, cette célèbre formule a connu dans l’univers de l’enseignement des sciences un sort quelque peu comparable à celui de l’expression “ Big Bang ” en cosmologie : forgées l’une comme l’autre dans le but de dénoncer la vision d’un processus, elles furent retournées et adoptées par beaucoup de ceux-là même que le trait visait.

⁴ Discours prononcé pour le centenaire de la ligue de l’enseignement, 1966.

⁵ 1913-1998. Un chapitre lui rend hommage dans Astolfi, Peterfalvi et Vérin 1998. Citation extraite de “ L’initiation à la méthode scientifique : l’étude de la nature ”, in Legrand L., *Pédagogie fonctionnelle pour l’école élémentaire*, t. 2, Nathan, 1973.

⁶ Observation, Hypothèse, Expérience, Résultats, Interprétation, Conclusions (Giordan, 1976 et 1978).

Depuis, elle n'a cessé d'être autant contestée en théorie que constatée en pratique : " la contestation de ce modèle est devenue un classique de la didactique des sciences " (Clément, 1998), mais " OHERIC répond toujours " (Demounem et Astolfi, 1996) et " les enseignants ont si bien intériorisé cette méthode qu'elle leur semble la seule possible " (Giordan, 1999). La méthodologie préconisée par les instructions officielles s'étant progressivement orientée vers un *enseignement par problèmes scientifiques*, la donne a quelque peu été modifiée : sans jamais avoir été clairement définis, des " problèmes " ouvrent maintenant les chapitres de la plupart des manuels scolaires, comme les séquences des professeurs. La critique porte néanmoins sur le côté parfois artificiel de ces problèmes et sur la démarche très linéaire qui s'ensuit, qui laisse peu de place à l'exploration (Coquidé, 1998) et minimise le rôle de l'hypothèse au profit de l'expérience-démonstration (Bomchil et Darley, 1998).

L'enseignement des sciences est-il condamné à errer dans cette impasse, entre dénonciation théorique et adoption pratique ?

Plutôt que se situer toujours dans un compromis peu satisfaisant, la suggestion avancée dans ces lignes est qu'il vaut mieux, pour la formation de leur esprit scientifique et critique, chercher *moins souvent* à mettre les élèves en situation de résolution de problèmes, mais en contrepartie les laisser, au moins parfois, mener *réellement* une investigation pour les résoudre.

Placer les élèves le plus souvent possible dans une " activité " dont le professeur a l'initiative, même s'ils voient quel problème elle vise à résoudre, paraît moins fructueux que d'alterner des séquences d'activités de résolution conçues par eux et des séquences où l'explication provient d'apports du professeur. Les premières dans lesquelles nos élèves peuvent, par eux-mêmes, réfléchir, proposer et entreprendre, et les secondes où l'enseignant déploie ses efforts pour leur faire *comprendre* sans les faire, dans le même temps, *entreprendre*.

Car à quoi sert, pour la formation de l'élève, de *faire semblant* à répétition de mener des investigations, avec, par exemple, des " fiches de T.P. " toutes prêtes que les élèves n'ont qu'à suivre ? Ne vaut-il pas mieux s'y atteler moins souvent, mais mieux, mais vraiment ?

D'une part, ce n'est pas forcément plus long : s'il devient *logique* pour les élèves de s'orienter vers telle observation sur le réel, directe ou provoquée, ou vers tel document s'y substituant, *parce qu'ils sont à la recherche d'explications*, le temps consacré ensuite à l'obtention et/ou à l'exploitation des résultats – qui représente l'essentiel du temps d'une telle séquence - reste le même, que ce travail soit entrepris à leur initiative ou sur injonction du professeur. Et ce que l'on " perd " en sollicitant et en suivant leurs propositions, on le gagne non seulement en formation intellectuelle mais aussi en cohérence, et finalement aussi en temps quand, par exemple, un binôme d'élèves met en route telle expérience parce qu'il l'a proposée dans le but de tester son idée, et non pour suivre le protocole du prof en traînant les pieds.

D'autre part, il y a toujours des parties du programme qui se prêtent à une transmission plus directe des connaissances, et où il peut paraître moins pertinent ou moins essentiel de se consacrer à des activités de recherche. Si l'on constate que le temps manque, utilisons-les pour avancer plus rapidement en veillant à s'en tenir au " programme minimum " (les débordements étant souvent aussi faciles que tentants), choisissant de ne pas mener d'investigations à ces moments-là pour mieux en vivre de véritables à d'autres, dans une " stratégie de l'accordéon " en quelque sorte. A cet " accordéon inter-investigation " peut s'adjoindre un " accordéon intra-investigation " : d'une mise en situation de recherche à l'autre, on peut choisir de ne pas développer les mêmes étapes. Sur tel sujet, par exemple, leur demander de formuler des hypothèses, puis fournir aux élèves des résultats expérimentaux, sur tel autre d'énoncer des conséquences testables, sur un autre encore d'imaginer un protocole et de le réaliser... et une autre fois enfin leur faire mener la séquence intégralement.

Personne ne nie les difficultés de l'apprentissage d'une réelle investigation scientifique. Celui-ci ne peut être spontané, et prenant en compte les critiques qui viennent d'être rappelées, il s'agit ici de proposer un outil de construction, à manier sans rigidité pour conserver tout son intérêt à la formation de l'esprit scientifique. S'il est présenté sous la forme d'un nouveau sigle, DiPHTeRIC, l'utilisation qui en est préconisée vise à écarter le piège d'une substitution aux erreurs anciennes d'erreurs plus séduisantes.

En gardant en mémoire à quel point la démarche du scientifique au laboratoire peut s'éloigner d'une succession d'étapes logiques et rigoureuses, et tout en laissant le champ ouvert aux voies de traverse et aux tentatives infructueuses, cet outil est proposé dans le but de rappeler à l'enseignant quel type de question poser éventuellement aux élèves pour les relancer dans leurs investigations. Il est clairement destiné à servir de levier pour cheminer à partir de propositions exploratoires venant des élèves eux-mêmes, et non à les entraîner dans une marche forcée sous la docte baguette du professeur.

2. Trois axes pour la formation de l'esprit scientifique

L'intérêt de former l'esprit scientifique des élèves s'impose certainement à tous, ainsi que le bénéfice qu'ils peuvent en retirer, en cultivant chez eux l'habitude de s'interroger sur le monde avec curiosité, puis d'interroger le monde avec les outils de la pensée qu'on les aura aidés à façonner. Reste à savoir quelles procédures pédagogiques sont les mieux adaptées à une telle acquisition. Indépendamment de ce que permet actuellement, ou non, l'institution et les programmes scolaires, on peut avancer les trois axes complémentaires suivants, explorés à des degrés divers dans l'enseignement des sciences :

1. *Initiation* à la **démarche scientifique** par la **reconstitution de ses étapes** les plus formatrices, au cours de séquences d'investigation.
2. *Immersion* des élèves en tant qu'acteurs dans une **recherche scientifique réelle**, sur un sujet à leur portée.
3. *Analyse* des cheminements suivis et des obstacles rencontrés dans l'**histoire des sciences**.

L'**axe 1** repose sur une *initiation* qui permette de parcourir des secteurs caractéristiques de la démarche scientifique, en faisant appel à l'esprit créatif des élèves (émission d'hypothèses, ...) tout en développant leur rigueur logique (déduction de conséquences testables, ...) et leurs capacités expérimentales. Avec le risque de donner une image caricaturale de la science si l'écart n'est pas nettement établi entre ces activités de classe et toute la complexité de la recherche au laboratoire. Cet obstacle peut être surmonté de deux manières :

- en rapprochant davantage les pratiques de la classe de la démarche du chercheur : respect de l'initiative des élèves et du caractère non linéaire de leur itinéraire ;
- en développant les approches des **axes 2 et 3**, qui pourvoient à donner une image de la recherche scientifique conforme à la réalité.

L'**axe 2**, prolongement idéal de l'axe 1, se propose d'être une mise en situation grandeur nature, sur un projet limité mais intégralement conduit par des élèves très autonomes (bibliographie, problématisation, conception de protocoles, tâtonnements, échecs...), qui se retrouvent ainsi concrètement confrontés aux méandres et aux difficultés d'une investigation scientifique. Il nécessite le dégagement d'un temps propre, pour une formation méthodologique non liée à l'acquisition de connaissances.

L'axe 3 permet une prise de recul par rapport aux pratiques et donne aux élèves un regard plus général sur la construction des sciences. Ils y rencontrent des idées anciennes qui peuvent se rapprocher de leurs propres représentations initiales, mesurent les obstacles qui ont dû être lentement surmontés avant d'accéder au savoir actuel. Ils y voient aussi le savant dans son cheminement souvent chaotique, aux prises avec la résistance du réel et parfois avec celle de ses propres conceptions...

Qu'en est-il de chacun de ces trois axes dans les modalités actuelles de l'enseignement des sciences ?

2.1. École d'escalade

L'initiation "en salle" à la démarche scientifique (**axe 1**), dans laquelle s'inscrit l'outil proposé ici, correspond aux préoccupations habituelles des enseignants et aux consignes officielles, qui donnent des indications sur la marche à suivre :

" Il est nécessaire de rappeler qu'en sciences de la vie et de la Terre, pour tout sujet d'étude, on recherche un ou plusieurs **problèmes** biologiques ou géologiques, point(s) de départ de la démarche explicative ". (B.Kern, I.G. de SVT, 1998)⁷. " Cette démarche amène les élèves à rechercher des **hypothèses**. Celles-ci sont **éprouvées** en ayant recours à l'expérimentation ou à l'exploitation d'informations complémentaires " (documents d'accompagnement de SVT, Cycle Central). " Comme dans les classes précédentes, l'enseignement des SVT met fortement l'accent sur la formation au raisonnement scientifique, à la méthode expérimentale (...) dans le cadre des problèmes scientifiques qui fondent les sujets et orientent les démarches " (programme de 3^{ème}). L'épine dorsale de la démarche préconisée est donc : **Problèmes - Hypothèses - Test des hypothèses**, " **PHT** ".

Le sens des mots utilisés est ici important puisqu'il s'agit de ce qui doit fonder les sujets et orienter les séquences : autant que les fondations soient solides, et l'orientation convenable.

Un **problème scientifique** devant être résolu par une démarche *explicative*, il correspond à une *recherche d'explication* (solution) –ce qui le distingue de la simple **question**, recherche d'**information** (réponse).

" [La formation scientifique] est caractérisée par la maîtrise progressive d'une démarche hypothético-déductive (...). Cette formation met en œuvre notamment des capacités d'induction, des raisonnements déductifs, l'imagination créatrice et l'esprit critique " (R. Demounem, 1989)⁸.

" **Hypothético-déductif** " indique que l'on teste une conséquence **déduite** de l'hypothèse, dans le sens d'Aristote : qui " s'ensuit nécessairement ". On peut aussi rappeler la définition qu'il donne de l'**induction** : elle " consiste à partir des cas individuels pour accéder aux énoncés universels " (*Topiques*, I-1 et I-12). Le texte de cadrage des nouveaux programmes de lycée poursuit : " L'expérimentation est une démarche essentielle des sciences (...) Il faut enseigner à l'élève cette démarche, en acceptant les tâtonnements, les erreurs, les approximations. (...) Tout ceci montre qu'il faut privilégier avant tout l'enseignement de la démarche scientifique " ⁹.

Il semble donc nécessaire que l'enseignant connaisse bien la démarche scientifique, errances comprises, tout en acceptant de la réduire à une vision simplifiée centrée sur l'axe " PHT ", sans pour autant confondre cette approximation avec la réalité : c'est ce que propose l'outil DiPHTeRIC.

⁷ Évaluation des capacités expérimentales en TS en SVT. Bilan de l'expérimentation conduite par l'IGEN de SVT.

⁸ *Utiliser des objectifs de référence en classe de Seconde*. Biologie & Géologie. MEN, 1989.

⁹ *L'enseignement des sciences au lycée*, annexe des nouveaux programmes des lycées, B.O. H. S. du 12 août 1999.

2.2. Premiers de cordée

Si aucune *immersion* dans une recherche réelle (**axe 2**) n'est actuellement prévue en France, différentes structures ont été tour à tour mises en place, favorisant l'autonomie des élèves.

Rappelons que l'option " Sciences Expérimentales " en Première Scientifique (1993-2000) avait pour but " l'initiation à la méthodologie scientifique expérimentale " : on devait s'efforcer de " valoriser l'autonomie et la créativité des élèves " en " privilégiant [leur] initiative ". Un flambeau repris par les " thèmes " de Seconde des nouveaux programmes : " dans le cadre d'une large autonomie l'élève réinvestit certains aspects des **démarches scientifiques** " ; " l'enseignant valorise l'apport et l'esprit créatif des élèves ". Les TPE (Travaux Personnels Encadrés) devaient eux aussi être le cadre d'une prise d'autonomie, permettant de " développer l'esprit de recherche et d'initiative (...) dans un esprit créatif et/ou expérimental ". Puisque ces TPE " représentent une investigation " ils pourraient être l'occasion, en sciences, sinon de vivre une démarche scientifique, du moins de **rechercher l'objectivité scientifique** par une mise à l'épreuve d'affirmations à caractère hypothétique (ex. de sujet traité en 2000-2001 : " *le chocolat, un anti-dépresseur ?* ").

Ces T P E, " élaborés par les élèves qui sont mis en situation de responsabilité dans la conduite d'un projet jusqu'à son terme " rappellent l'expérience ambitieuse mise en place en Angleterre dans le cadre du projet Nuffield de rénovation de l'enseignement des sciences (1962-1972). Chaque élève de 16 à 18 ans devait consacrer 10% de son temps scolaire à la conduite d'un travail pratique indépendant, nourri d'une recherche bibliographique et consigné dans un *cahier de laboratoire* précis, lui permettant de " cerner la démarche scientifique dans sa totalité ", et où le maître devait " s'effacer au cours de la réalisation du projet : il est un conseiller et non le directeur du travail ".

Le projet anglais, qui comportait principalement la réalisation de travaux pratiques, reposait sur l'idée que " le fait d'acquérir en moins de 10 ans une formation scientifique générale qui a exigé plusieurs siècles de recherche déforme nécessairement l'esprit des élèves. Il est utile de découvrir à l'occasion d'une tâche concrète les exigences méthodologiques et techniques de la démarche scientifique et de faire apparaître le caractère ouvert des résultats acquis " ¹⁰.

On peut certes craindre que la part d'initiative des élèves ait été variable suivant les maîtres et les sujets (*Action de désherbants sur la croissance de plantes* semble plus affriolant que *Les pigments de 2 variétés de Azolle ficuloïdes (spectrophotométrie)*), et que le simple constat (effet de.... sur...) n'ait pas forcément conduit à la recherche d'explications. Du coup l'objectif affiché de former autre chose que " des chercheurs confinés dans les laboratoires " et qui marchent droit et bien comme un cheval qui porte des œillères " , n'a peut-être pas toujours été atteint. On en retiendra cependant l'avantage pour l'élève de vivre la situation, de devoir " résoudre les incidents techniques et changer éventuellement ses hypothèses de travail ", et la subsistance dans les programmes actuels d'un conséquent domaine nommé *Scientific enquiry* (recherche scientifique, à différents niveaux entre 5 à 16 ans), indépendant de l'acquisition des connaissances, où sont développées des " aptitudes à l'investigation " (investigation skills).

2.3. Ascensions historiques

L'**axe 3** prend appui sur l'histoire des sciences, dont l'intérêt pédagogique toujours reconnu en France. Tous les éducateurs lui ont rendu hommage, et le *style historique* est proclamé dès 1954 " incontestablement le plus riche et le plus fécondant pour l'esprit " ¹¹. Une valorisation qui n'a longtemps eu d'égale que sa marginalité dans l'enseignement des sciences si l'on excepte la citation

¹⁰ " Projet Nuffield : advanced biological science ", Host V., Paris, INRDP. Cf. Gohau G. (1987), " Difficulté d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences ", *Aster*, 5, et " Redécouverte d'hier à aujourd'hui ", in Hulin N., dir., *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902*. Études et documents, à paraître, 2002.

¹¹ Campan (F.), Inspecteur général de l'Instruction publique, " Les méthodes dans l'enseignement des sciences naturelles ", *Cahiers pédagogiques* n°6, 1954.

ponctuelle de quelques grandes figures (Darwin, Wegener...) ou la présentation le plus souvent tronquée ou réarrangée de leurs travaux (on verra plus loin l'exemple de la découverte des neurotransmetteurs par Otto Loewi).

Mais cette portion congrue semble être en train de s'accroître, à lire un certain nombre de textes officiels ou documents de travail récents.

- Un rapport de l'Inspection Générale de SVT : “ **Quelle place pour l'histoire des sciences ?** L'intérêt épistémologique de l'histoire des sciences souligné pour la formation des enseignants est admis par tous (...). Envisager l'évolution des idées dans leur contexte historique (...) est une orientation qui paraît utile ”¹².

- Le texte de cadrage des nouveaux programmes des lycées¹³ : “ Dans bien des cas, rien ne peut remplacer l'exposé historique. Celui-ci a un côté culturel irremplaçable, qui situe la découverte scientifique dans son contexte temporel mais aussi montre comment les découvertes scientifiques ont influencé le cours de l'histoire. L'exposé historique permet de mesurer la difficulté que l'humanité a rencontrée pour résoudre des problèmes qui peuvent aujourd'hui sembler élémentaire ”.

- Le programme de Physique (Seconde) : “ *Restituer la dimension historique du développement des sciences* peut jouer ici un rôle spécifique essentiel. (...) La curiosité pour les sciences et pour les mécanismes de la création en générale se nourrit à l'évidence de connaître les controverses passées, les longues impasses comme les avancées brutales, les grandes synthèses qui surprennent le bon sens et bouleversent la perception immédiate et intuitive du monde ”.

- Le programme de SVT :

En Seconde, trois des “ thèmes ” au choix sont historiques :

- *Découverte du mécanisme de l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, etc.*, qui est l'exemple sur lequel fut mis en évidence l'écart entre le cheminement réel de Claude Bernard et la présentation arrangée qu'il en fit après coup (Grmek, 1973) ;

- *La découverte de la double circulation du sang*, pour laquelle William Harvey suit une démarche hypothético-déductive en énonçant ses hypothèses, puis les expériences qui venaient les tester ;

- *La découverte de la structure en double hélice de l'ADN* où l'on peut suivre les errances des chercheurs et voir apparaître les modèles hypothétiques baroques de Watson et Crick (bases à l'extérieur) ou de Linus Pauling (ADN à trois brins), tandis que Rosalind Franklin se moque des “ gamineries ” du duo qui sera nobélisé et suit une démarche inductiviste en refusant d'échafauder des hypothèses...

En Terminale S, enseignement de spécialité, un thème a “ pour objectif principal de situer le développement de la génétique avec une perspective historique, dans un état d'esprit permettant de comprendre l'évolution d'un savoir scientifique ”. “ Il est envisageable de placer les élèves dans la situation de Morgan ”¹⁴.

Ces analyses peuvent être l'occasion de donner la vraie image des démarches scientifiques, et l'on peut espérer que nos élèves arriveront du cours de Physique en ayant vu Kepler établir ses célèbres lois après avoir considéré ses découvertes comme une “ charretée de crottin ”, comme le relate l'astronome Carl Sagan (1980).

On peut regretter qu'il ne s'agisse que d'analyses optionnelles en Seconde pour les SVT : mieux aurait valu, pour rendre ces approches plus fructueuses encore, les intégrer à part entière dans les programmes en dégagant un temps de réflexion sur la méthodologie scientifique et sur l'exposé modifié que peut en faire le chercheur après coup.

A titre d'exemple, en Angleterre toujours, les élèves ont un horaire prévu pour étudier, dans la partie *Ideas and evidence in science*, comment travaillent les chercheurs aujourd'hui et comment ils travaillaient dans le passé, comment des données expérimentales et la pensée créatrice se combinent pour fournir une explication scientifique (11-14 ans), comment des controverses scientifiques

¹² *L'enseignement des SVT au collège et au lycée : entre essor des connaissances et préoccupations sociales* , Rapport de l'Inspection Générale de SVT, Ministère de l'Éducation nationale, 1997

¹³ Cf. note 9.

¹⁴ Document d'accompagnement du programme de SVT de Terminale S. Document de travail, février 2002.

peuvent provenir de différentes manières d'interpréter des données empiriques, comment des explications, des modèles ou des théories scientifiques ont été modifiés ou remis en question à la lumière de données scientifiques nouvelles (15-16 ans)¹⁵.

En définitive, même si des avancées semblent s'opérer en ce qui concerne les **axes 2 et 3**, elles demeurent encore marginales, et les consignes pédagogiques qui figurent dans les programmes et les documents d'accompagnement restent centrées sur un type d'enseignement correspondant à l'**axe 1**, l'élaboration de séquences d'investigation dans le cadre de démarches scientifiques.

Dans le but de bien en cerner les contours et d'asseoir les bases de la simplification proposée avec DiPHTeRIC, il est utile de s'intéresser aux modélisations de la, ou plutôt *des* démarches scientifiques, puis aux études destinées à reconstituer le vécu de la découverte.

3. Les Pères de la Méthode

3.1. Chacun sa voie

Avide de déchiffrer l'organisation du monde, l'esprit humain se caractérise par sa tendance spontanée à forger les chaînons manquants d'une histoire qui ne lui parvient toujours qu'incomplète.

On trouve déjà dans les récits des deux pères de l'Histoire, Hérodote (v. -484/-426) et Thucydide (v.-460/v.-400), des exemples de méthodes : le premier narre dans *L'Enquête* (II, 2) l'expérience de Psammétique I^{er}, pharaon (v.-663/-609) qui, conjecturant que les Égyptiens étaient le peuple le plus ancien de la terre, isola deux nouveau-nés de toute influence verbale humaine et attendit que les enfants prononcent leur premier mot naturel pour voir s'il serait bien égyptien : hypothèse réfutée, c'est paraît-il du phrygien qui sortit de la bouche des enfants... Thucydide nous relate, lui, la peste qui faillit l'emporter comme des milliers d'Athéniens, dont Périclès, et précise que " le mal ne frappe pas deux fois un même homme, ou du moins la rechute n'était pas mortelle. Aussi les rescapés recevaient-ils les congratulations des autres " ¹⁶. Méthode **hypothético-déductive** pour l'Égyptien, **inductive** pour les Athéniens : on voit qu'il n'y a pas qu'un chemin qui mène à la conclusion, sans garantie pour autant sur sa fiabilité.

Depuis l'Antiquité est débattue la question de la plus ou moins grande liberté à accorder au travail de l'esprit par rapport aux perceptions sensibles, aux théories par rapport aux faits, ainsi que l'illustre le tableau *L'école d'Athènes* de Raphaël où Platon lève son doigt vers le ciel des Idées tandis qu'Aristote oriente sa main bien davantage vers le sol.

Pour les empiristes ne jurant que par l'induction, on s'élève régulièrement en ayant confiance dans les faits solides sur lesquels on prend appui. Mais généraliser l'acquis peut être risqué, tout comme la roche la plus friable se rencontre juste sous le sommet de l'Everest.

Les déductivistes, eux, descendent de la cime des idées en étant sûrs de la fiabilité de leur raisonnement, c'est-à-dire de la solidité de la corde... mais sans voir la faille du point d'ancrage. Et on ne manque pas de s'interroger sur leur accès au nuage de départ, par un saut spéculatif bien téméraire.

Les médecins Hippocratiques reprochaient déjà à leurs collègues de " formuler des hypothèses creuses au lieu de se livrer à des observations attentives (...) sans pour cela s'égarer dans des systématisations qui ne résistent pas à l'épreuve des faits " ¹⁷.

Galien nous dit que " les empiriques disent que tout est découvert par l'expérience, nous, nous disons que certaines choses le sont par l'expérience et certaines autres par la raison, car l'expérience n'est pas susceptible de tout découvrir, pas plus que la raison seule " ¹⁸.

¹⁵ *Science*, The National Curriculum for England, Dpt of Education and Employment Curriculum Authority, Londres 1999.

and Qualifications and

¹⁶ *La Guerre du Péloponnèse*, II (51), éd. et traduction de Denis Roussel, Folio Classique, Gallimard 2000.

¹⁷ *Ibid.*, note p. 735.

3.2. Méthodes d'araignées, de fourmis et d'abeilles

Au 17^{ème} siècle, ces méthodes sont codifiées par Francis Bacon et René Descartes qui rejettent tous deux la lecture des Anciens comme source du savoir. Bacon (1620)¹⁹, qui voit surtout chez les Grecs “ la jactance de l'affirmation péremptoire ” et “ des discours de vieillards oisifs à de jeunes gens ignorants ”, brandit le flambeau de l'induction. “ Nous étant avancé au-delà des rivages des arts anciens, nous équiperons l'entendement humain pour la traversée ”.

Il recommande d'analyser les faits, prône le recours à l'expérience. La “ véritable méthode inductive ” qu'il propose peut être schématisée ainsi :

1. Observations multiples, recensements (partie informative) ;
2. “ Première Vendange ” : ébauche d'interprétation, axiome ;
3. Vérification de l'extension de l'axiome à d'autres cas (partie opérative). S'il se présente une instance adverse, il ne faut pas “ sauver l'axiome ” mais le corriger.

“ La voie à suivre monte d'abord aux axiomes et descend ensuite aux œuvres ”. La montée, “ d'abord escarpée et difficile, finit en pays découvert ” : c'est sans doute à Bacon que Bernard se réfère dans sa citation montagnarde.

Descartes entend naviguer sous un autre grément, s'avancant doutant de tout, hors ce qui s'impose à son esprit : son existence pensante et quelques “ idées claires et évidentes ” sur le monde, dont les causes des phénomènes ne se peuvent que déduire. Dès 1628, il rédige les *Règles pour la direction de l'esprit*. Elles préfigurent son fameux *Discours de la Méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans la science* (1637) : “ Premièrement, j'ai tâché de trouver en général les principes, ou premières causes, de tout ce qui est, ou qui peut être ”. “ Après cela, j'ai examiné quels étaient les (...) effets que l'on pouvait déduire de ces causes ”. Mais divers effets sont déductibles : il lui faut trouver un moyen de distinguer “ ceux qui sont sur la terre d'une infinité d'autres qui pourraient y être ” : le réel du possible. Il se met alors à “ chercher derechef quelques expériences ” pour savoir ce qu'il en est (*Discours*, 6^{ème} partie). Mais il le fit trop peu, et Voltaire (*Le siècle de Louis XIV*, 1752) ne le rate pas : “ Descartes fit le contraire de ce qu'on devait faire : au lieu d'étudier la nature, il voulut la deviner ”.

Même si tout semble opposer Francis qui montre ses pieds et René son cerveau cogitant, c'est pourtant sur l'expérience qu'ils se rencontrent dans leurs écrits, importante pour trancher entre deux ou plusieurs idées incertaines – preuve que Bacon finit par en avoir, et que Descartes quitte son perchoir spirituel pour mettre la main à la pâte lorsqu'il l'estime nécessaire.

Bacon (1620 II, 36) décrit “ l'instance cruciale ” (que Descartes nommera “ expérience cruciale ”) : il multiplie les exemples de sujets à propos desquels deux ou plusieurs hypothèses sont possibles, et montre comment trancher *en testant les conséquences qu'elles impliquent*. Ainsi pour savoir si les marées correspondent à un remplissage du réservoir océanique ou à un va-et-vient d'est en ouest, il faudrait déterminer si les hautes marées sont simultanées ou non des deux côtés de l'Atlantique. Le poids est-il une vertu de l'objet ou un effet de l'attraction “ par la masse corporelle de la Terre ” ? “ La seconde hypothèse entraîne les conséquences suivantes ” : une horloge mue par des poids sera ralentie en hauteur, accélérée au fond d'une mine.

Le reproche classique que l'on fait aux expériences cruciales ne le concerne pas : il n'écrit nulle part que si deux hypothèses sont en concurrence, la condamnation expérimentale de l'une établit l'autre *ipso facto* – il formule même ses conclusions très prudemment. Popper (1934 p. 283) précise qu'une telle expérience est cruciale quand elle permet de décider “ en réfutant l'une d'elles au moins sans, bien sûr, prouver l'autre ”. Cette remarque méthodologique vaut aussi pour nos élèves : en classe, s'ils ont formulé trois hypothèses, ils ne seront souvent pas gênés, si deux se trouvent

¹⁸ *La méthode thérapeutique*, III, 1.

¹⁹ *Novum Organum* (PUF 1986) pages 62, 77, 93, 132, 161-163 (méthode : aphorismes I-103 à 106), 221, 226.

réfutées, d'adopter la troisième par élimination, sans la tester et sans non plus supposer qu'ils n'ont pas tout imaginé...

Bacon, avec sa montée lente aux axiomes puis sa redescende aux faits, se voyait tenant le juste milieu, avec la " méthode de l'abeille " (I, 95) à juste distance des fourmis qui amassent sans rien faire et des araignées qui tirent tout d'elles et tissent leurs toiles dans les airs : l'abeille récolte, puis produit.

Même s'il utilise de manière marginale son instance cruciale, il y montre qu'il maîtrise bien les éléments *hypothèse, déduction d'une conséquence* et *test* de celle-ci.

De son côté, Descartes avance sur un sol plus ferme quand il soumet les hypothèses à l'expérience ou à l'observation. Pour le système du monde (1644), " on peut user de diverses hypothèses pour expliquer les phénomènes des planètes ", mais celle de Ptolémée " est contraire à plusieurs observations qui ont été faites depuis peu ", notamment les phases de Vénus (III 15-17).

Outre l'intérêt méthodologique, on peut admirer l'audace de Descartes qui se réfère à Galilée et écrit, onze ans seulement après sa condamnation (III, 33-45) :

33. " Dans le temps que la Lune et la Terre parcourent ce grand cercle qui leur est commun et qui fait l'année, la Terre tourne environ trois cent soixante-cinq fois sur son essieu ".

Mais il prend tout de même des précautions :

44. " Que je ne peux point toutefois assurer que celles [les hypothèses] que je propose sont vraies ".

45. " Et tant s'en faut que je veuille que l'on croie toutes les choses que j'écrirai "...

En 1633, il s'appretait à publier *Le Monde*, traité héliocentrique, qu'il avait prestement rangé en apprenant au moment où il cherchait à se procurer *Le Système du Monde* de Galilée que celui-ci venait d'être condamné : " je me suis quasi résolu de brûler tous mes papiers "20.

En 1644, il les ressort tout en terminant par " je n'assure ici aucune chose " et " je soumets toutes mes opinions à l'autorité de l'Église "... (IV, 207).

Ce n'est peut-être qu'une coïncidence, mais qu'un amoureux des chiffres comme Descartes fasse tourner la Terre dans l'article 33 (année de la condamnation de Galilée) et freine son enthousiasme dans le 44 (année de la publication de son texte audacieux), j'aurais été membre du Saint-Office, je l'aurais soupçonné de se payer notre tiare...

Les outils intellectuels essentiels de la science moderne sont donc aussi en place chez Descartes : hypothèses, déduction et confrontation aux données. Avec même une intéressante remarque logique : une hypothèse qui correspond aux observations n'est pas pour autant vraie. Il prend l'exemple des montres fermées qu'on retrouve chez Einstein (1936 p. 34) : " deux montres qui marquent les heures en même façon, et (...) qui n'aient toutefois rien de semblable en la composition de leurs roues " (1644 IV 204).

À la même époque (entre 1600 et 1630), Kepler, Galilée et Harvey se distinguent par leurs découvertes.

Kepler, jeune prof de maths à Graz, s'arrête en plein cours la craie à la main : traçant une figure géométrique il s' imagine avoir percé le " secret du monde ", la raison du nombre et des distances des planètes²¹. Il remercie son " Dieu Très Bon " mais bientôt confronte ses idées avec les données d'observation de Tycho Brahé et a le courage de s'incliner - puis de rebondir vers des hypothèses plus fructueuses.

Galilée, de son côté, développe un rapport ambigu avec l'expérience. Ne jurant que par le pouvoir explicatif des théories mathématiques qui permet d'atteindre la certitude, il n'ignore pas l'expérience, mais ne la réalise en général pas, persuadé qu'elle ne peut que confirmer la théorie...

Il la convoque moins pour vérifier son idée, qui sera maintenue " même contre l'évidence des sens ", que pour contrer un adversaire ou lui faire une démonstration, s'il est vraiment hermétique à la force du seul raisonnement. Ainsi, dans l'exemple célèbre de la pierre lâchée du haut du mat d'un bateau en mouvement : " Avez-vous fait l'expérience ? - Non, et je n'ai pas besoin de la faire, et je

²⁰ Lettre à Mersenne, fin novembre 1633.

²¹ Kepler, *Le secret du monde*, 1596, Gallimard 1984.

peux affirmer sans aucune expérience qu'il en est ainsi, car il ne peut en être autrement²². Pourtant, vingt ans plus tôt, moins sûr de lui sans doute, il a su faire intervenir observations et expériences pour tester des idées : “ Que Grazia fasse l'expérience. Je l'ai faite, et je sais qu'il a tort ” (contre l'idée aristotélicienne qu'un bateau flotte mieux dans la vaste mer que dans un petit port)²³. Et dès décembre 1610, il braque sa lunette sur Vénus pour y chercher les phases prédites par Copernic.

Harvey, qui fut médecin de Bacon, utilise pour sa découverte de la circulation du sang (1615, publiée en 1628)²⁴, comme on l'a vu à propos de ce thème de Seconde, une procédure dont on a peu de traces avant lui puisqu'il émet explicitement des *hypothèses* dont il éprouve les conséquences par l'*expérience*.

Newton (*Principia* 1687), inductiviste, déplorait les spéculations cartésiennes et essayait de “ coller aux faits ” autant que possible, de manière baconienne.

C'est dire qu'il n'y a pas une seule démarche scientifique : le père de la loi de la gravitation universelle serait outré si on lui déclarait que le découvreur des lois de la réfraction ou celui de la circulation du sang avaient suivi la même démarche que lui, tant Newton tenait à se démarquer de Descartes et semble diverger aussi de Harvey ou Galilée, même s'il n'est pas si certain qu'on trouverait de tels écarts si l'on avait pu assister à leurs entreprises.

3.3. Vers le plateau fleuri

De l'affrontement entre méthodes déductive et inductive sortira vainqueur... la méthode hypothético-déductive, ou encore “ méthode de l'hypothèse ”, devenue la méthode scientifique par excellence et privilégiée dans notre enseignement. “ Le premier auteur qui propose clairement la méthode hypothético-déductive (...) est le philosophe byzantin Johannes Philoponos (VI^e siècle) ” affirme Grmek (1997 p. 22) : Jean Philopon d'Alexandrie qui publia ses *Commentaires* d'Aristote à partir de 517.

Diderot, avant Claude Bernard, dresse le portrait de cette méthode dans une sorte de manuel à l'usage des naturalistes débutants, les *Pensées sur l'interprétation de la nature* (1753).

D'emblée, il ébranle les cloisonnements : “ L'intérêt de la vérité demanderait que ceux qui réfléchissent daignassent enfin s'associer à ceux qui se remuent ” (§1). Il s'inscrit dans la continuité de la méthode de l'abeille de Bacon : “ On a battu bien du terrain en vain, si on ne rentre pas dans la ruche chargée de cire. On a fait bien des amas de cire inutile, si on ne sait pas en former des rayons ” (§9). Pour la méthode, “ l'observation recueille les faits, la réflexion les combine, l'expérience vérifie les résultats de la combinaison ” (§15). Tout est dit, et tient dans une formule talentueuse : “ Combien de conjectures à former d'imagination, et à confirmer ou détruire par l'expérience ! ” (§34).

Au 19^{ème} siècle, la voie ouverte par Bacon est poursuivie par J. Herschel (1830) puis W. Whewell (1840) et J. S. Mill (1843) qui, tout en discutant âprement des règles de l'induction, font une place aux hypothèses à tester par les conséquences qui s'en déduisent²⁵. Parallèlement, pour A. Comte (vers 1835) “ l'induction ou la déduction (...) seraient certainement insuffisantes (...) si l'on ne commençait souvent par anticiper sur les résultats en faisant une supposition provisoire ”. Les seules hypothèses admissibles sont pour lui les anticipations conjecturales conduisant à des “ conséquences observables, susceptibles de confirmer ou d'infirmer la supposition primitive ”. Rien de mieux que chez Diderot, mais la démarche hypothético-déductive se fraie son chemin²⁶.

²² Minois G., *Galilée*, Que sais-je ? PUF 2000.

²³ Shea W., *La révolution galiléenne*, Seuil 1992.

²⁴ Harvey W. *De motu cordis*, 1628, Bourgois 1990.

²⁵ notamment John Herschel, *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, 1830.

²⁶ Comte A. *Cours de philosophie positive*, 28^{ème} leçon.

Entre alors en scène Claude Bernard, qui, développant les idées fondamentales de son ami chimiste Chevreul²⁷, édifie un “ monument élevé à l’honneur de la méthode ” selon Pasteur²⁸, qui estime qu’“ on n’a rien écrit de plus lumineux, de plus complet, de plus profond sur les vrais principes de l’art si difficile de l’expérimentation ”, et prophétise : “ L’influence qu’il exercera sur les sciences médicales, sur leur enseignement (...) sera immense ”.

Si Claude Bernard navigue, dans le sillage de Bacon, en tentant comme lui d’“ éviter les écueils ” de l’emprise des faits comme de celle des idées, il renvoie malgré tout dos à dos les frères ennemis : “ Bacon, qui a conçu si puissamment et si clairement l’importance et le but de la méthode expérimentale dans les sciences, n’en a pas compris le mécanisme ” (*Pcpes* p. 210). “ Descartes, tout en tenant compte des expériences physiologiques de son temps, exposa une physiologie de fantaisie et à peu près imaginaire ”²⁹.

Bacon voulait une marche graduée “ adhérant à la moelle des choses ”, sans hypothèse audacieuse, et un entendement pourvu “ non pas de plumes, mais plutôt de plomb et de lest, pour lui interdire tout saut et tout vol ” (*I*, 104). Pour Bernard, l’envol est souhaitable, mais contrôlé : “ L’empirisme est un donjon étroit et abject d’où l’esprit emprisonné ne peut s’échapper que sur les ailes d’une hypothèse. (...) Tout le secret de la méthode expérimentale consiste à ne pas laisser l’idée s’envoler, s’égarer, mais à toujours la ramener aux faits en lui coupant incessamment les ailes à l’aide des ciseaux de l’expérience ” (*Pcpes* p. 115).

L’hypothèse est la pièce maîtresse de sa méthode, mais une hypothèse qui dérive d’un travail de l’esprit sur les faits et les connaissances, et qui n’échappe pas aux fourches caudines des tests de contrôle qui la ramèneront sur terre. “ Sans hypothèse, c’est-à-dire sans une anticipation de l’esprit sur les faits, il n’y a pas de science, et le jour de la dernière hypothèse serait le dernier jour de la science ” (*Pcpes* p. 77).. “ La méthode expérimentale, en tant que méthode scientifique, repose toute entière sur la *vérification expérimentale d’une hypothèse scientifique* ” (*Intro.* p. 304). Cette méthode, Claude Bernard l’a rendue familière aux biologistes en résumant par deux fois dans son œuvre les **Principes de la méthode expérimentale** (*Intro.* p. 54 et *Pcpes* p.78) :

“ Le savant complet est celui qui embrasse à la fois la théorie et la pratique expérimentale.

1° Il constate un fait ;

2° à propos de ce fait, une idée naît dans son esprit ;

3° en vue de cette idée, il institue une expérience ;

4° de cette expérience résultent de nouveaux phénomènes ”.

À quoi il ajoute : “ Après qu’il aura constaté les résultats (...), son esprit reviendra pour raisonner, comparer et juger si l’hypothèse expérimentale est vérifiée ou infirmée ”.

Ces démarches sont anciennes, vieilles comme l’humanité sans doute.

Les hommes préhistoriques s’extrayant lentement de leur gangue animale ont imprimé aux matériaux les plus durs la trace de leurs pensées les plus fines, et l’on ne saurait dire, face au tranchant d’une lame, ce qui dans son élaboration relève plus de l’induction, de la déduction, de l’hypothèse.

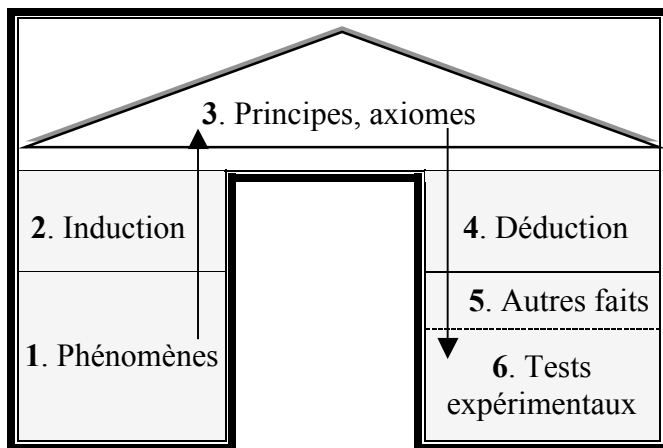
Les deux grands chemins de l’établissement du savoir forment les piliers de “ l’arche de la connaissance ” selon l’historien des sciences australien David Oldroyd (1986 p. 362) : “ un modèle du processus d’investigation que j’ai nommé *The Arch of knowledge*. Selon ce modèle, par induction à partir des “ faits ” observés (phénomènes, ou données) sont atteints les “ principes ” scientifiques ; et de ces principes sont tirées des déductions vers d’autres faits, qui peuvent être testés expérimentalement, si bien que l’entière structure acquiert un certain niveau de solidité et de sécurité ”.

En suivant ces plans, élevons cette arche à la méthode :

²⁷ Cf. Jean Gayon, “ Les réflexions méthodologiques de Claude Bernard : contexte et origines ”, *Bull. Hist. Épistém. Sci. Vie*, 1996, 3 (1), 75-91.

²⁸ Pasteur L. “ Claude Bernard. Idée de l’importance de ses travaux, de son enseignement et de sa méthode ”. *Le Moniteur universel* n° 311 du 7-11-1866, repris par Jean Rostand dans Cl. Bernard, *Morceaux choisis*, Paris, 1938.

²⁹ *Leçons de pathologie expérimentale*, 1872. (*in Principes* p. XL).



<i>Arche de la connaissance</i>						
Étapes			Méthode			
1	2	3				Méthode inductive simple. Un seul pilier : édifice branlant.
		3	4	5		Méthode déductive simple. 5 aussi (peu) assuré que 3.
1	2	3	4	5		Méthode inductive élaborée. + 6 parfois.
		3	4	5	6	Méthode
1		3	4	5	6	
1	2	3	4	5	6	

On avait effectivement une arcade de ce type avec Bacon : un large et solide pilier escaladé de manière graduelle menant à une “ vendange ” d’axiomes tout en haut, puis la descente vers d’autres faits. On verrait l’hypothèse de Claude Bernard, quant à elle, s’envoler autour du pilier gauche jusqu’au fronton, saut inventif ne passant pas forcément par l’induction, avant d’être ramenée *manu militari* par la maréchaussée expérimentale à travers le pilier droit.

Aussi convaincantes qu’elles puissent paraître, les entreprises de législation des démarches scientifiques, quand elles sont présentées par leurs auteurs, courent cependant le risque d’être arrangées dans leur sens, faute d’un regard extérieur objectif sur la succession des étapes décrites. Et si l’enseignant décide de s’en inspirer pour la démarche à suivre en classe, il risque lui-même d’être victime de ce biais. Plus instructive encore sur leurs démarches serait l’observation des chercheurs dans leurs laboratoires. Y a-t-il, en effet, correspondance entre ces descriptions idéalisées et les pratiques de terrain ? Il faudrait pouvoir s’immiscer, et les élèves avec nous, dans les laboratoires derrière le dos des chercheurs des siècles passés, les voir scruter cornues et tubes à essai, tempêter sur l’expérience qui ne marche jamais ou noter soudain l’idée fulgurante.

4. Démarche scientifique au laboratoire : l’analyse des historiens des sciences

4.1. Par-dessus l’épaule des chercheurs

L’historien Mirko Grmek (1973, 1991) a comparé les notes de laboratoire de Claude Bernard avec les récits de ses travaux dans *l’Introduction*, montrant que la présentation finale prenait la forme d’une succession idéalisée et reconstruite. “ Contrôlés et éclairés par les manuscrits, les exemples de *l’Introduction* prennent une signification nouvelle. Les raisonnements clairs et élégants des textes imprimés cachent une réalité complexe : cours tortueux des recherches, piétinements, échecs, éclairs de génie, que seul le témoignage des manuscrits nous fait maintenant entrevoir ”. (1991 p. 19). “ La plupart des hypothèses de travail succombaient en cours de route et la lecture des publications de Bernard ne permet même pas de soupçonner leur existence éphémère. La découverte faite, ce feu d’artifice de mille et une hypothèses s’efface devant une seule trajectoire lumineuse : la montée apparemment solitaire de la bonne idée ” (p. 108).

Pour mieux illustrer ce “ réarrangement rationnel du processus de la découverte ”, Grmek cite des travaux similaires sur des documents de première main concernant la genèse de 70 inventions modernes, révélant la distorsion des faits historiques par les inventeurs eux-mêmes. Il cite aussi l’ouvrage d’E. Wolff (*Les chemins de la vie*, 1963) où il “ trace de façon admirable la route tortueuse qu’emprunte la recherche scientifique et souligne la simplification *a posteriori* du travail expérimental ” (p. 90).

L’examen critique de Grmek nous a permis de savoir *comment ne procédait pas* Bernard. Mais on a souvent omis de considérer qu’il nous permettait aussi de découvrir *quelle était* sa démarche : “ Le schéma bernardien : observation → hypothèse → expérience, nous paraît **correct seulement en**

tant que modèle simplifié, élément d'un enchaînement n'aspirant à représenter la réalité qu'en **première approximation**. Le processus réel de la découverte est un jeu continu d'actions et de rétroactions entre la pensée et l'observation, entre la théorie et la pratique. (...) Si l'enchaînement se fait comme l'indique le schéma de Bernard, il ne consiste certainement pas en une seule série linéaire de triplets mais dans la superposition de plusieurs réponses enchevêtrées ” (p. 89).

Or, d'une part cette approximation peut suffire pour *l'initiation* au cheminement scientifique, la démarche historique pourvoyant à une représentation plus exacte du processus réel de la découverte, d'autre part les investigations des élèves peuvent présenter, à leur échelle, cet aspect buissonnant de la découverte, pour peu que l'on prenne en compte leurs diverses hypothèses, y compris celles qu'on sait fausses (mais logiques), qu'on explore les voies latérales rencontrées chemin faisant...

Voici comment Grmek résume la démarche bernardienne *réelle* : “ Face à des faits nouveaux, Claude Bernard laissait libre cours à son imagination, inventait **plusieurs hypothèses** possibles et, en fonction **des déductions** faites à partir de ces hypothèses, procédait à l'expérimentation. Les **expériences vérifiaient ou renversaient** ses suppositions ” (p. 108) : la ligne directrice paraît claire, en dépit des enchevêtrements.

En contrepoint de ces avancées erratiques, prenons un exemple moins sinueux soumis à la vigilance de Grmek (1973 pp. 92-93), qui s'inscrit dans les travaux sur le mécanisme de l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, autre thème préconisé dans le programme de Seconde. Il s'agit de la démarche suivie au sujet du problème de la variation du quotient respiratoire (QR). L'intérêt ici est de disposer d'une narration qui n'est pas celle du célèbre physiologiste reconstruisant après coup sa démarche, mais celle de l'historien des sciences qui examine à la loupe ses notes de laboratoire : on y voit bien quel fut son cheminement. Claude Bernard, qui croit que le quotient respiratoire (QR) est stable, est surpris par sa valeur chez des animaux à jeun, et par ses variations au cours de la digestion (travaux de Reignault et Reiset). “ **Pour expliquer** ces faits expérimentaux, Bernard **supposa** que le sang change sa capacité d'absorption des gaz en fonction de divers facteurs internes ou externes. Il fit alors appel à des **expériences** (...). Le 2 avril 1853, il prit du sang sortant des veines hépatiques d'un chien (...). Comment **interpréter** ces expériences ? (...) Autant de questions sans réponses ”. Bernard tente alors une expérience quantitative, qui donne “ des résultats qui sont en accord parfait avec nos connaissances actuelles ”.

En résumé :

Données initiales	problème	hypothèse	expériences	résultats	interprétation	conclusions
<i>résultats</i> de Reignault	des variations de QR à jeun et en digestion	sur les propriétés du sang	1 qualitative	changements de couleur du sang	ne parvient pas à interpréter (“ Autant de questions sans réponses ”)	
<i>théorie</i> (QR invariable)			2 quantitative	absorption d'oxygène	“ le sang est d'autant moins apte à absorber l'oxygène qu'il contient une plus forte proportion de sucre ”	“ les animaux à jeun consommeraient beaucoup d'oxygène parce que... et les animaux en digestion en consommeraient moins à cause de... ”

Si un tel enchaînement simple, décrit par Grmek lui-même et donc **au-dessus du soupçon de réarrangement a posteriori**, n'est pas la règle, il montre qu'il n'y a pas non plus de fatalité à ce qu'il ne se produise jamais ! Tout comme les astrologues, pour paraphraser un trait de Voltaire, *les scientifiques ne sauraient avoir le privilège de se fourvoyer tout le temps dans leurs démarches !...*

Un autre exemple historique, abordable dans l'actuel programme de 1^oS, est édifiant : la découverte par Otto Loewi en 1921 de ce que l'on nommera plus tard les neurotransmetteurs.

On savait depuis 1866 (Ludwig et Cyon) que certaines fibres nerveuses accéléraient le cœur tandis que d'autres le ralentissaient : *données initiales*. En 1903, le *problème* est pour Otto Loewi celui de nerfs cardiaques qui ont des effets opposés, alors que leurs manifestations électriques sont à peu

près identiques. Il imagine qu'il pourrait y avoir un lien entre ce fait et la façon dont certaines drogues stimulent tandis que d'autres dépriment et fait l'hypothèse que les deux nerfs libèrent des substances chimiques différentes à leurs extrémités lorsqu'ils sont stimulés³⁰. Laissons Loewi (1960) narrer lui-même la suite, l'inspiration lui venant en pleine nuit : " je m'éveillai, allumai la lumière, et jetai quelques notes sur un petit bout de papier. Puis je me rendormis. Il me revint à six heures du matin que j'avais écrit quelque chose de très important, mais j'étais incapable de déchiffrer mon écriture. Ce dimanche fut le jour le plus désespéré de toute ma vie scientifique. La nuit suivante, à trois heures du matin, l'idée me revint. C'était celle d'une expérience permettant de déterminer si oui ou non l'hypothèse de la transmission chimique que j'avais formulée dix-sept ans auparavant était correcte. Je me levai immédiatement, me rendis au laboratoire, fis une simple expérience sur un cœur de grenouille en accord avec mon intuition nocturne ”.

Sur cet exemple, les écarts dans le temps permettent de bien identifier les étapes suivies.

L'essentiel est ici de se rappeler que si de pareilles démarches linéaires sont peu courantes, rien ne les interdit non plus. En didactique, le souci doit être, si les élèves adoptent une telle succession simple en classe, de ne pas les laisser croire qu'elle se rencontre toujours avec autant de limpidité.

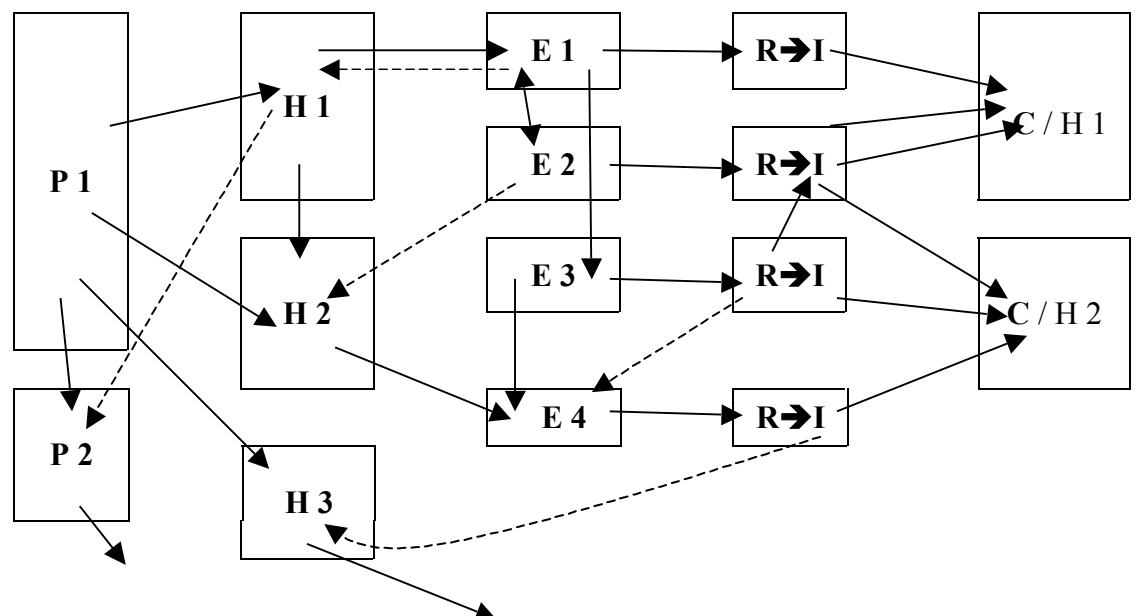
4.2. Arabesques sur les chemins de la découverte

La figure suivante fournit une vision synthétique des cheminements désarticulés habituels de la recherche scientifique, que l'on retrouve présentés sous une forme voisine dans les schémas proposés par J. Lalanne (1985) à l'issue de l'analyse des voies de la découvertes chez différents chercheurs : Needham, Spallanzani, Claude Bernard, Pasteur, Watson et Crick....

Elle permet d'illustrer le fait qu'une investigation peut partir dans plusieurs directions et que ses premières étapes peuvent être revisitées, elle permet aussi de dégager ces pôles majeurs que sont le passage par le stade de l'hypothèse et, une fois celle-ci émise et retenue, le recours aux tests.

P désigne les problèmes scientifiques, **H** les hypothèses, **E** les tests expérimentaux.,

R-I les résultats et leurs interprétations, **C** les conclusions.



Autant dire que si l'objectif est de placer les élèves *dans le vécu de la science* qui se fait, ce ne peut se faire qu'en les laissant emprunter des routes tortueuses (**axe 2**). Mais *si l'objectif est épistémologique* : savoir comment la science se construit, on aura tout intérêt à leur faire étudier l'histoire des sciences... et à les nourrir des réflexions, telles que celles qui précèdent, sur les

³⁰ G. R. Taylor, *Histoire illustrée de la biologie*, Hachette 1963.

chemins de traverses de la connaissance (**axe 3**). *Si l'objectif est méthodologique*, il en va tout autrement : établir des liens cohérents entre un problème, une ou des hypothèses, en discerner des conséquences testables... participe, sans conteste, à la formation de l'esprit scientifique (**axe 1**). Mais il doit alors être bien clair pour tout le monde que, d'une part, ce n'est pas parce que l'étape suivante *paraît logique* qu'elle est pour autant *prévisible*, et que, d'autre part, tel binôme de potaches du lycée Einstein ne fait pas mieux en deux heures bien ficelées que Louis Pasteur en deux ans...

5. Démarche scientifique dans l'enseignement

5.1. OHERIC au crible

Forts de ces analyses des zigzags des actes et de la pensée reconstitués par les historiens des sciences, on mesure l'écart entre les cheminements réels des chercheurs et le tracé simple et linéaire du modèle OHERIC. Si le célèbre sigle apparaît dès 1976 dans la thèse d'André Giordan, la salve majeure est tirée en 1978 par un bataillon de didacticiens des sciences (Astolfi, Giordan, Gohau, Host, Martinand, Rumelhard, Zadounaïsky pp.7-9) dans le décapant *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* : " OHERIC ne répond plus ? Le naufrage de l'éducation scientifique ?

La science n'est-elle pas devenue une messe, une messe d'avant concile :

- avec ses évêques : les chercheurs (...);
- avec ses prêtres, les enseignants, englués dans un engrenage de rites (toujours le même type de démonstration : (...) le sacro-saint OHERIC, que l'on dit trouver dans le missel de Claude Bernard) ". Plus de vingt ans et des cohortes d'élèves plus tard, Giordan (1999 p. 37) déplore de faire le même constat : " Dans des IUFM, dans des formations au brevet d'animateurs scientifiques ou dans des cours de philosophie de Terminale, la démarche expérimentale est toujours présentée ainsi, de façon linéaire et idéalisée ! "

La convergence des approches épistémologique et didactique permet de déconstruire OHERIC. Il n'est pas inintéressant, dans le cadre de ces formations, de partir de ce schéma, qu'il s'agisse d'une représentation initiale ou d'une simple base de discussion, afin d'en dégager les insuffisances, et d'arriver à une approche plus conforme au cheminement scientifique réel.

On peut répertorier les points faibles suivants :

1. démarche suivie de manière rigide et linéaire,
2. absence de questionnement (problème ou simple question),
3. primauté contestable de l'observation,
4. absence de prise en compte des structures antérieures des élèves (représentations notamment),
5. test uniquement expérimental,
6. conclusion laissant croire qu'on a *prouvé* en classe.

1. Si la démarche est linéaire, c'est que ce n'est sûrement pas celle des élèves mais celle de l'enseignant qui est suivie. C'est ce qui arrive quand on va " piocher " la bonne hypothèse dans les suggestions des élèves, pour pouvoir (enfin) passer à l'expérience. Rien pourtant n'interdit de prendre en compte toutes les hypothèses des élèves dès lors qu'elles sont logiques (ce qui ne signifie pas qu'il les faille toutes tester expérimentalement), et de leur laisser suggérer, puis mettre en œuvre les tests appropriés : nous reviendrons sur l'aspect pratique d'une telle procédure.

L'analyse de séquences de biologie en Troisième et en Seconde (Orlandi 1991, Monchamp 1993) montre que les expériences en classe ont davantage un statut d'*illustration* que de test, la conclusion étant souvent annoncée comme telle dès l'introduction justifiant la recherche : " la formation de l'esprit scientifique paraît loin... "

2. Un *problème* devrait précéder et engendrer les hypothèses : " c'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique " ; " le sens du problème, donc le nerf du progrès " (Bachelard, 1938). " La science ne commence que s'il y a un problème " (Popper 1963). ...OHERIC devient alors, sous certaines plumes, O~~P~~HERIC.

3. La primauté accordée à l'*observation*, dont tout découlerait de manière inductive, a longtemps régné dans l'enseignement des sciences où l'élève devait pratiquement se comporter comme dans la phrase de d'Alembert : “ on généralise ses premières remarques, l'instant d'après qu'on ne remarquait rien ”. Pour Kant, nos observations ne sauraient être “ faites au hasard et sans aucun plan tracé d'avance ”³¹. L'idée d'une observation *armée* se retrouve chez A. Comte (1835) : “ pour se livrer à l'observation, notre esprit a besoin d'une théorie quelconque. Si en contemplant les phénomènes nous ne les rattachions point immédiatement à quelques principes (...), le plus souvent, les faits resteraient inaperçus à nos yeux ”. Claude Bernard est, sur ce point, plus ambigu. Le programme assigné au “ savant complet ” commence par : “ 1° Il constate un fait ”. Il concède cependant qu'il est extrêmement difficile de faire des observations sans idée préconçue. Dans la troisième partie de l'*Introduction* (p. 215), il affirme :

“ Des circonstances très diverses peuvent servir de point de départ aux recherches d'investigations scientifiques ; je ramènerai cependant toutes ces variétés à deux cas principaux :

1° Une recherche expérimentale a pour point de départ une observation.

2° Une recherche expérimentale a pour point de départ une hypothèse ou une théorie ”.

Ainsi, poussé par “ la théorie régnante à cette époque ”, part-il à la recherche d'un organe destructeur de sucre... pour finir par en découvrir un, le foie, qui en produit ! Idées et faits se rejoignent quand il précise : “ L'origine d'un travail original est toujours la poursuite d'un fait qui ne rentre pas dans les idées admises ”³². Nos élèves de terminale pourront l'avoir analysé en philosophie : “ Le point de départ de la recherche n'est pas le fait empirique considéré à part, mais le problème posé par le fait, la contradiction entre le fait découvert et les conceptions théoriques antérieures. ”³³. En classe, “ l'observation s'appuie donc sur les concepts antérieurement acquis ” (Guichard, 1998). Mais l'enseignant a sa propre interprétation toute construite et ne repère pas toujours l'obstacle qui empêche l'élève de “ voir ”, par exemple, la division cellulaire sur une préparation microscopique. On peut utilement se souvenir cependant qu'on ne voit pas, quand un stylo tombe d'une table, le trajet très étiré dans l'espace qu'il suit à une vitesse prodigieuse.

4. Ce règne sans partage de l'observation a également été revu quand l'idée de notions communes, fausses, “ fixées profondément ” et faisant obstacle (Bacon 1620) a été modernisée dans le concept de *représentation* chez l'enfant (Piaget 1926, puis Bachelard 1938). Nos élèves, tout comme les chercheurs, n'abordent jamais un sujet sans idées préconçues. On verra comment elles peuvent trouver toute leur place en classe au niveau de leur traitement en tant qu'hypothèses.

On peut, en fait, difficilement soutenir qu'une recherche puisse partir de la *seule* observation. Théories, observations, représentations, croyances, obstacles, acquis antérieurs, modèles, expériences “ pour voir ”... forment un ensemble d'où peuvent surgir les interrogations initiales. On peut distinguer, dans cet ensemble, les idées (vraies ou fausses) et les “ faits ” : si la plupart du temps idées anciennes et faits nouveaux se frottent pour allumer la mèche d'une investigation, les faits seuls ne peuvent le faire, tandis que les idées seules ont ce pouvoir : une simple réflexion sur les limites de ses connaissances peut suffire.

On peut nommer **données initiales** cet ensemble, de composition variable d'une fois à l'autre.

5. Quant au contrôle de l'hypothèse, il n'est pas forcément expérimental et peut être effectué à l'aide d'observations, comme le souligne encore C. Bernard : “ Cette vérification peut être obtenue tantôt à l'aide d'une observation, tantôt à l'aide d'une expérience ” (*Intro.* p. 304). Il prend l'exemple d'“ un naturaliste qui observe des animaux dans toutes les conditions de leur existence et qui tire de ces observations des conséquences qui se trouvent vérifiées et **contrôlées par d'autres observations** ” (*Intro.* p. 46).

On distingue aujourd'hui “ démarche expérimentale ”, dans laquelle l'hypothèse est testée à l'aide d'une expérience, et “ démarche scientifique ” (sous-entendu : hypothético-déductive), type de

³¹ *Critique de la raison pure*, préface de la seconde édition, 1787.

³² Cité par Grmek, 1973.

³³ Huisman D. et Vergez A., *Philosophie tome 2 : La connaissance*, Marabout, 1994.

démarche plus large dans lequel une expérience, mais aussi une observation, une simulation ou une modélisation peuvent aussi tester l'hypothèse. Ce n'est en effet pas l'expérience, le fait que l'observation de contrôle soit *provoquée* qui est déterminant dans cette démarche, mais la soumission à un test, la confrontation de l'hypothèse au réel, ou, à défaut, à un substitut du réel. En définitive, ce sera toujours une **observation**, directe ou provoquée, du réel ou d'un de ses substituts, qui servira de contrôle à l'hypothèse : on recueille dans tous les cas, par l'analyse des résultats, des données nouvelles qui nous semblent utiles pour expliquer.

TEST : Observation			
Observation directe , avec ou sans instruments		Observation provoquée : expérience	
<i>de la nature</i>	<i>d'un substitut</i>	<i>sur la nature</i>	<i>sur un substitut</i>
Observation <i>au sens strict</i>	Travail sur document	Expérience <i>au sens strict</i>	Modélisation

6. La conclusion statue sur l'hypothèse. On ne peut prétendre que, dans une salle de T.P. où une expérience a par exemple été réalisée huit fois, dont peut-être cinq ou six donnent des résultats concordants, l'hypothèse émise a valablement et définitivement été éprouvée. D'ailleurs que se passe-t-il chaque fois que des élèves, pourtant consciencieux, ou l'enseignant lui-même n'arrivent pas à obtenir le *bon* résultat ? L'hypothèse est-elle réfutée et, portant sur un domaine du savoir scientifique suffisamment central pour être dans les programmes, cela fait-il le lendemain la une des journaux ? Non : " L'expérience est ratée et c'est tout ! " s'exclame G. Gohau à propos d'un T.P. censé révéler la présence d'enzymes respiratoires dans les tissus... (*in Astolfi et al. 1978 p.95*). Une analyse complexe faite au laboratoire et publiée par l'APBG³⁴ avait montré que lesdites enzymes étaient bel et bien impliquées dans l'histoire. " Réjouissons-nous qu'il en fût ainsi. Si Bourgeois avait montré le contraire, nous aurions eu mauvaise conscience rétrospectivement... mais cela n'aurait rien changé pour nos élèves ". Quelques années plus tard, un autre article montrait qu'il y avait contradiction entre les " lois du réflexe " et ce que montrait le T.P.³⁵ : " les lois perpétuées par les manuels sont fausses, elles ont été falsifiées par des générations de professeurs de lycées... qui ont continué à les enseigner (et à les faire souligner en rouge !). Manifestement, l'expérience de cours est non falsifiante ".

Il est donc nécessaire de ne pas laisser les élèves considérer que *leur* conclusion a une valeur définitive au seul vu du fond de leur tube à essais, et d'insister sur le fait que seule la reproduction des mêmes résultats et la soumission de la même hypothèse à d'autres tests par la communauté scientifique, qui dispose de moyens d'investigation autrement plus puissants, permet de statuer sur celle-ci. Leur propre résultat sera simplement conforme, ou non, à ce corpus collectif.

5.2. L'outil DiPHTeRIC

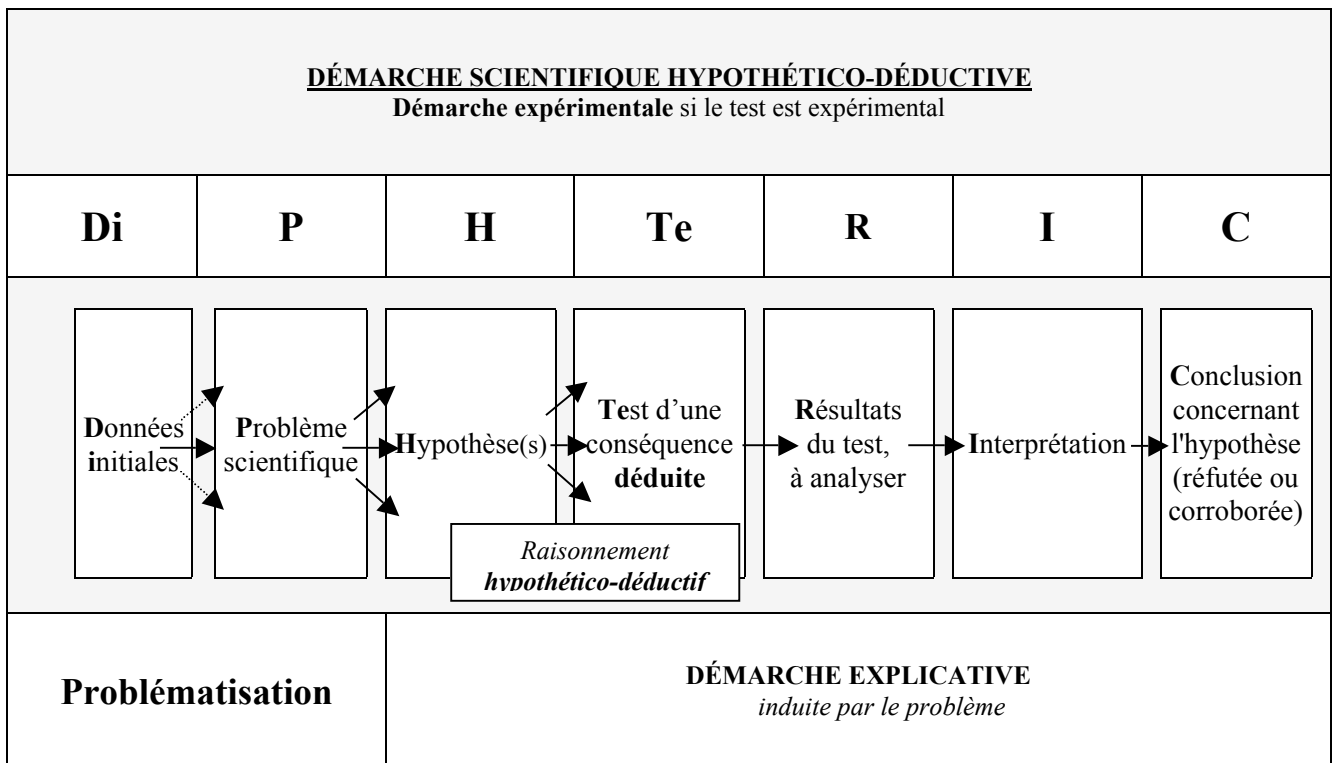
Conscients de ces insuffisances, il paraît possible de proposer une révision du modèle OHERIC. Mais une révision est-elle suffisante ? Ne risque-t-elle pas de conserver une partie au moins des défauts recensés ? Le problème majeur n'est pas d'avoir un modèle de démarche serrant au plus près le fonctionnement réel de l'activité scientifique. Le problème essentiel est : dans les activités que je mets en place, quelle part d'initiative pour les élèves, quelle activité intellectuelle, qu'est-ce qui peut et doit *venir d'eux* ? En ce domaine, un outil ne vaut que par la manière dont il est employé, et c'est sur ce point que nous nous arrêterons principalement.

³⁴ Bourgeois C. " Utilisation du bleu de méthylène pour mettre en évidence les déshydrogénases respiratoires ", *Bull. APBG*, I-1966.

³⁵ Gribenski A. " À propos des "lois des réflexes" dites "lois de Pflüger" ", *Bull. APBG*, I-1972.

En tenant compte des remarques précédentes, proposons un **modèle simplifié et approximatif de la démarche scientifique hypothético-déductive**, qui s'appuie à la fois sur l'épistémologie et sur l'analyse du travail des scientifiques au laboratoire, précédemment étudiés, qui pourrait servir de fil conducteur souple pour le travail en classe - *sans prétendre*, point essentiel, que ce modèle parvienne à décrire la réalité complexe des cheminements des chercheurs.

Ce schéma, qui reprend la facilité du sigle, n'a donc aucune prétention canonique, et si le risque existe qu'il soit transformé en carcan pour des élèves réduits à faire ce qu'on leur dit, on verra comment fuir ce piège *en pensant les interventions de l'enseignant* pour laisser les élèves vivre le cheminement de l'investigation.



Données initiales : Idées et Faits (observations, acquis, conceptions, théories, résultats d'expériences " pour voir " ...).

Soit **DiPHTeRIC**³⁶, un sigle facile à retenir... surtout pour un biologiste.

Ce modèle reste éloigné de la réalité par la fausse image de linéarité simple qu'il peut donner, même si des flèches montrent, à chaque niveau, la possibilité de bifurcations (qui peuvent aussi être des retours en arrière, non figurés pour ne pas surcharger). D'autre part, il ne prend en compte que la démarche hypothético-déductive, et non la diversité des approches possibles : découvertes par voie inductive ou par rencontre fortuite.

Schéma imparfait de la démarche chaloupée du chercheur, il représente tout de même la voie qu'en général il aimerait suivre, et n'est ici qu'un modèle utile en didactique pour un entraînement à la démarche scientifique. Il est clair que la situation de classe est artificielle et très différente d'un contexte de recherche scientifique réelle, que les élèves pourraient vivre par l'*immersion* de l'**axe 2** et connaître par les *analyses* de l'**axe 3**. Dans cet artifice, l'enseignant se borne à réunir les conditions d'une *initiation* (**axe 1**) pour développer chez les élèves une activité intellectuelle comparable à celle des chercheurs. Repère pour l'enseignant, il doit surtout se lire " en creux ", pour avoir à l'esprit les questions incitatives à poser, si nécessaire, pour aiguillonner la progression, mais il n'est pas destiné à être présenté aux élèves - sauf dans le cadre de l'**axe 3** d'analyse des cheminements, au développement encore timide actuellement dans l'enseignement.

³⁶ Cariou J.-Y. *Lexique sommaire en didactique des sciences*, document interne, IUFM, Paris, 1997.

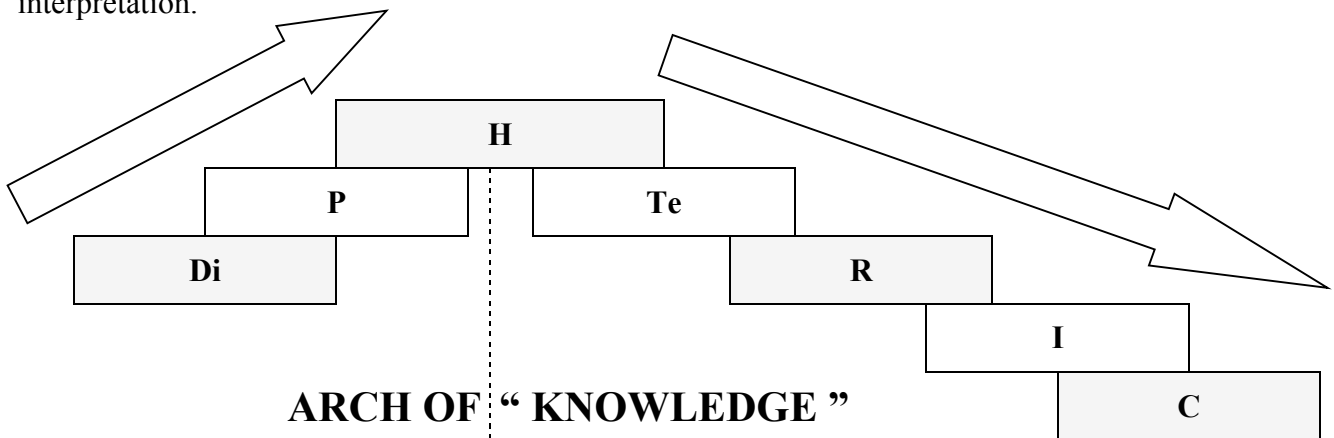
Les “ données initiales ” qui en forment le point de départ **regroupent idées et faits**, dans une conception de la démarche scientifique qui n’exclut ni les unes, ni les autres et la fait partir toujours d’idées antérieures (acquis, représentations) et, le plus souvent, de données nouvelles, en opposition avec l’une et l’autre des formules antithétiques suivantes :

“ Il est indispensable d’acquérir une **démarche scientifique** ; de ne jamais oublier que les théories et les modèles ne peuvent venir qu’après l’étude des faits ”³⁷. “ Les théories ne procèdent jamais des faits. Les théories ne procèdent que des théories antérieures souvent très anciennes ”³⁸.

On peut supposer que, dans les deux cas, la barre a été excessivement tordue pour la redresser dans un sens ou dans l’autre.

5.3. Retrouver l’arche perdue

L’hypothèse constituant la clef de voûte de ce modèle, on peut faire apparaître, de part et d’autre, les deux montants de cette l’arche de la connaissance d’Oldroyd : un versant “ ascendant ”, qui mène aux hypothèses, explications provisoires possibles, et dans lequel le saut intellectuel principal se situe dans la construction des hypothèses à partir du problème, suivi d’un versant “ descendant ”, celui de la confrontation des idées au réel (ou à défaut à l’un de ses substituts) dans lequel les passages les plus délicats sont ceux de l’hypothèse à la conséquence testable, et des résultats à leur interprétation.



Pilier ascendant Invention d’un monde possible	Pilier descendant Restriction du possible par la confrontation au réel
Activités intellectuelles à l’œuvre :	
<p>Esprit créatif, imagination ↗ Curiosité, interrogation sur le monde, induction, analogie, intuition, invention.</p>	<p>Esprit logique ↘ Dédution (raisonnement formel). Éventuellement : raisonnement par analogie (test sur des modèles).</p>
<i>mais avec une part...</i>	
<i>...de cohérence : hypothèses fondées, et non opposées aux acquis.</i>	<i>...d’inventivité dans l’élaboration d’un test, dans l’interprétation des résultats.</i>

Présenter le cheminement sous cette forme permet de montrer qu’il met en jeu des formes différentes de l’esprit scientifique :

- **imagination, créativité et invention** dans la phase ascendante de problématisation puis d’élaboration d’hypothèses,
- **raisonnement hypothético-déductif et rigueur** de la confrontation au réel dans la phase descendante.

³⁷ Rapports du jury du CAPES 1995 et 1996. Il s’agit de contraindre les étudiants à s’appuyer d’emblée sur des données plutôt que sur des considérations théoriques.

³⁸ Canguilhem G. *Connaissance de la vie*, Vrin 1965.

5.4. Parallèles

On trouve dans la littérature pédagogique d'autres schématisations didactiques de la démarche scientifique, auxquelles on peut comparer l'outil DiPHTeRIC.

Ainsi, dans un article souvent repris, " *Sur la méthode expérimentale* ", Michel Develay (1989) propose les étapes suivantes :

1. Formulation du problème (à partir d'une volonté de connaissance gratuite ou d'une observation surprenante) ;
2. Émission d'une hypothèse ;
3. Vérification de l'hypothèse : dans une démarche scientifique, par observation, expérimentation, recherches documentaires, enquêtes...
4. Interprétation des résultats.

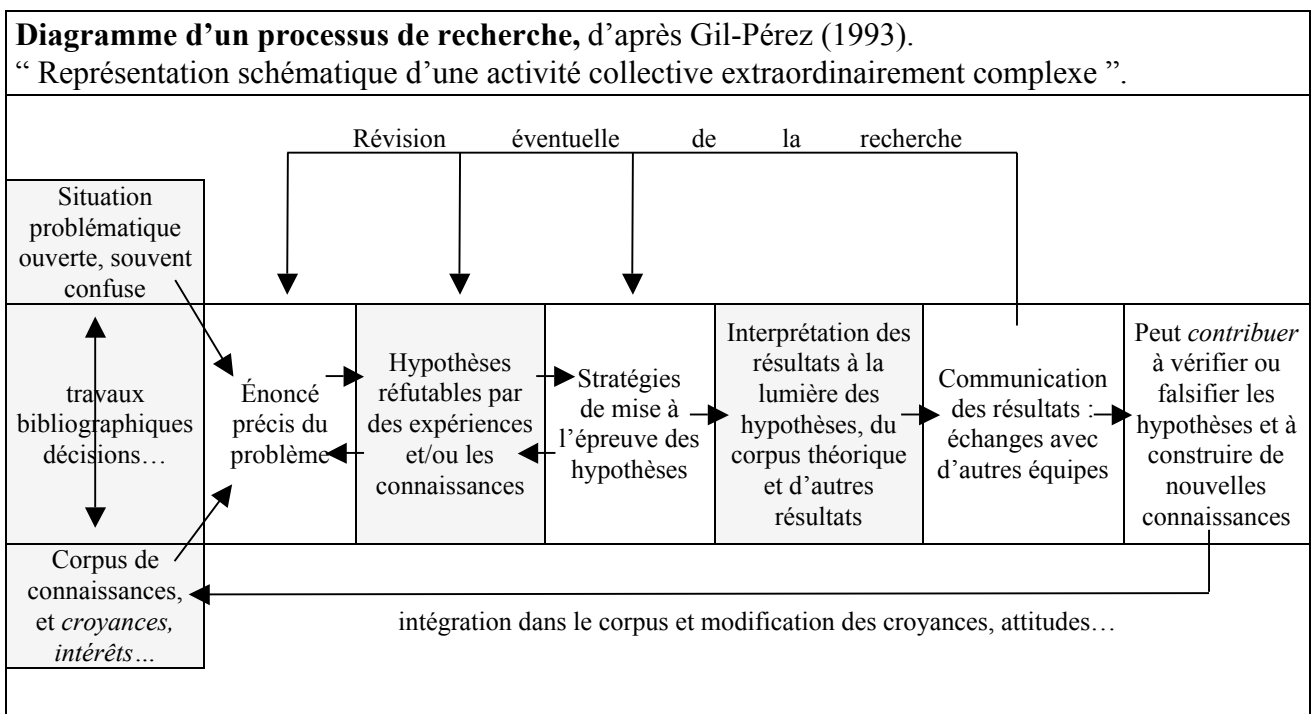
" Le schéma que nous proposons (...) matérialise les différentes étapes de la méthode expérimentale dans des situations d'enseignement, [qui] ne sont pas tant à penser chronologiquement que interactivement. Ainsi l'émission d'hypothèses n'existe parfois que parce que le sujet a présent à l'esprit les conditions de mise à l'épreuve de cette hypothèse, parce qu'il envisage, en même temps qu'il propose une hypothèse, l'expérience qu'il pourra conduire pour la confirmer. L'expérience aussi n'est parfois rendue possible que parce que les conditions de son interprétation sont réunies avant qu'elle ne soit mise en œuvre ".

Ce schéma est repris, notamment, dans un manuel récent destiné aux professeurs des écoles (Paccaud et Vuala, 1999).

Il peut se résumer ainsi, en gardant à l'esprit les interactions possibles signalées :

Problème → Hypothèses → Vérification → Résultats → Interprétation.

Daniel Gil-Pérez (1993), dans son article *Apprendre les sciences par une démarche de recherche scientifique*, décrit, dans un souci d'adaptation à une classe de " chercheurs novices ", le processus de recherche à l'aide un diagramme dont l'essentiel est présenté ci-dessous :



Même si l'auteur insiste davantage sur le corpus théorique et l'aspect social de la recherche, notre schéma, bien que plus simplifié encore, peut néanmoins être placé en parallèle avec ce diagramme :

Di	P	H	Te	R	I	C
-----------	----------	----------	-----------	----------	----------	----------

André Giordan (1999, p. 53), propose à son tour un schéma du “ développement de la démarche expérimentale au laboratoire ” qui va dans le même sens que celui de Gil-Pérez, et dans lequel de nombreuses flèches soutiennent l’idée que “ rien n’est linéaire cependant, parfois la démarche se fourvoie dans de fausses pistes. Mais, à chacune des étapes, il y a interaction entre question, hypothèse et expérience ”.

5.5. Opportunité d’un modèle

Le point crucial de l’initiation scientifique réside dans le fait de laisser les élèves échafauder puis éprouver **leurs** hypothèses, en arrivant à leur faire progressivement ressentir comme une évidence l’idée de tester les conséquences qu’ils en déduisent par les moyens de mise à l’épreuve qu’ils proposent (même s’il arrive qu’on doive leur substituer des moyens équivalents pour des raisons pratiques).

Il n’est dès lors pas dérangeant que des enseignants se servent, s’ils l’estiment pertinent, d’un outil qui leur rappelle la logique du cheminement de l’esprit, afin d’accompagner sans les contraindre les constructions des élèves. Il peut leur suggérer quelle question poser ou quelle remarque faire à un moment donné pour *stimuler* la progression des élèves, et non pas pour *leur dire* où ils doivent aller.

Trop souvent, dans la démarche mise en œuvre et censée s’opposer à un enseignement dogmatique, les élèves enchaînent les “ activités ”. Mais si ceux-ci passent du rôle de simples spectateurs à celui d’acteurs, le costume endossé peut n’être que celui de figurants réduits à l’accomplissement des besognes qu’on leur assigne, braves dans leur rôle de “ besons ” - pour reprendre le terme imagé d’une de mes collègues du Primaire. La plupart du temps, les enseignants sont satisfaits si leurs élèves ont bien manipulé, l’essentiel semblant être là, et beaucoup de séances de T.P. sont plutôt des travaux manuels si on y réalise des expériences dépossédées de leur valeur de test d’hypothèses : on est alors dans une forme de “ cryptodogmatisme ”³⁹...

On peut choisir plutôt de leur faire exprimer leurs manières de concevoir les choses, leurs propositions, et intervenir, si nécessaire, pour les orienter non à l’aide de solutions, mais de *principes* généraux : faire des suggestions en cohérence avec les acquis, concevoir des tests logiques par rapport aux idées avancées, savoir pourquoi on passe d’une étape à l’autre... Ce que l’on peut relancer de manière assez souple à l’aide de *questions incitatives* : Êtes-vous sûrs ? Comment savoir ? Comment faire ?...

6. Utilisation de l’outil

D’un point de vue pratique, et contrairement à un dogme répandu qui veut que tout soit fait de A à Z dans la même séance de T.P., au détriment de l’investigation, on a toujours intérêt à prévoir qu’une séquence **Di-P-H-Te-R-I-C** soit étalée sur deux séances, la première s’achevant sur des propositions de **Tests** (en classe entière par exemple), afin de pouvoir réunir les documents et/ou le matériel demandés pour la fois suivante. Cette suspension constitue aussi un moment utile pour chercher les données relatives à une hypothèse imprévue, mais logique, et, si l’on ne trouve rien, pour réfléchir à la manière d’y revenir avec les élèves : si la tester n’apparaît pas possible (manque de données) ou pas souhaitable, il faut, tout en en reconnaissant la logique, expliquer ce choix aux élèves.

³⁹ Héraïl P. “ Méthode expérimentale et cryptodogmatisme ”, *Bull. Union des Naturalistes*, 3-1959.

6.1. Exemple d'utilisation

Faisons fonctionner notre outil dans le cas d'une démarche d'investigation autour du déterminisme des battements cardiaques (classe de Seconde).

Les manuels scolaires utilisables par les enseignants et les élèves commencent dans cette optique par une ou plusieurs interrogations en début de chapitre. En voici des exemples :

1. Quelle est l'origine des battements cardiaques ?
2. Qu'est-ce que l'automatisme cardiaque ?
3. Le rythme automatique du cœur peut-il être modifié par le système nerveux ? (Sous le titre : Le fonctionnement cardiaque et son contrôle nerveux).

Seule l'interrogation 1 correspond à un problème scientifique : on cherche une explication, tandis que la question 2 la fournit. L'interrogation n'est pas longtemps énigmatique puisqu'il leur suffit de savoir lire le titre sur la même page.

Mieux vaut intituler le sujet, de manière neutre : “ Le rythme cardiaque et ses variations ”.

Di : Les **D**onnées **i**nitiales sont les acquis et les connaissances communes des élèves : le cœur est un muscle, qui bat en permanence, s'accélère à l'effort ou lors d'émotions... Et est sans doute pour certains le siège des émotions (Aristote est toujours là) !

Le problème du déterminisme cardiaque, que l'on se propose d'étudier ici, ne se pose pas spontanément pour les élèves : ça bat depuis toujours sans qu'ils aient à s'en soucier !

Un “ document d'appel ” peut être apporté par l'enseignant pour susciter les interrogations des élèves : par exemple, le cœur bien visible sur un embryon humain qui bat dès la 3^{ème} semaine de grossesse. Attirer l'attention sur ce moment où le cœur de l'enfant commence à battre, faisant palpiter du même coup celui des parents, permet d'obtenir facilement des interrogations sur le déclenchement et le maintien de ces battements chez l'embryon, et chez eux.

Autres voies d'entrée possibles :

- un document avec électrocardiogramme d'une personne normale (rythme 70 / min) et d'un greffé cardiaque (rythme 100) ;
- une question : comment faites-vous pour ne pas oublier de “ battre du cœur ” ? (ce qui, en fait, donne le problème). On peut aussi poser directement le problème scientifique ci-dessous, mais dans la mesure où l'on dispose avec les documents d'appel de bonnes bases de problématisation, autant garder nos questions en réserve.

P : “ Comment s'expliquent les battements cardiaques ? ”

H : Les élèves proposent assez spontanément que le muscle cardiaque est, comme les autres, sous commande nerveuse. Un élève m'a même récemment dit : “ pourquoi faire des hypothèses, on le sait que c'est par les nerfs ! ”... Ils procèdent là par **induction**, généralisant à partir de ce qu'ils savent du déterminisme du mouvement des autres muscles. Mais d'autres hypothèses sont bien sûr acceptables, et, s'appuyant sur leurs **représentations**, sur leur **imagination**, sur les analogies qu'ils peuvent faire..., les élèves vont proposer des mondes possibles : le cœur pourra y battre sous l'effet de la pression des poumons, ou de la pression artérielle, ou d'une substance dans le sang (comme l'adrénaline), ou de la chaleur du corps, ou, pourquoi pas, “ tout seul ”...

Te : Détaillons le traitement de l'hypothèse H1 d'une commande nerveuse. Les élèves peuvent en déduire, comme une conséquence nécessaire, qu'en coupant les nerfs parvenant au cœur, il cessera de battre. Ils doivent aussi proposer un test pour chacune des hypothèses évoquées : voir l'effet qu'aurait, sur les battements cardiaques, une ablation des poumons, une modification de la pression ou de la composition du sang, un refroidissement, etc.

H1 sera testée par exemple à l'aide d'une vidéo sur le fonctionnement du cœur isolé lors d'une transplantation cardiaque, ou d'un tableau de données expérimentales sur son rythme avant et après section des nerfs, document qui viendra ici à **la demande des élèves** ayant formulé l'hypothèse. Le professeur fournit également, s'il en dispose, les indications sur ce rythme pour les personnes

n'ayant plus qu'un poumon, ou en hypotension ou ayant froid : il peut en tout cas préciser que chez aucune l'activité cardiaque n'est suspendue.

R : Dans le cas où le test consiste à priver le cœur de ses nerfs, le résultat réel, à la surprise générale des élèves, apporte du nouveau : non seulement le cœur bat toujours, mais il bat *encore plus vite* que dans l'organisme... Ce nouveau problème **ouvre une voie de traverse** dans l'itinéraire, autre exemple de cheminement non linéaire (après le fait que plusieurs hypothèses sont prises en compte).

I : Mais restons pour l'instant sur la piste principale : le cœur bat toujours : l'hypothèse est réfutée.

C : Le cœur ne bat pas du fait d'une commande nerveuse. Ici le fait d'avoir fourni un document signifie que le résultat obtenu est général et entériné par la communauté scientifique, on peut donc conclure.

Cette conclusion rejoindra celles qui proviennent des tests des autres hypothèses.

On a obtenu, chemin faisant, de nouvelles données concernant le cœur isolé (**Di**) pour un nouveau **problème** (comment s'explique cette accélération ?) pour lequel les élèves disposent d'emblée de l'**hypothèse** d'un ralentissement par voie nerveuse... qu'ils peuvent proposer de **tester** en stimulant les nerfs impliqués.

L'essentiel, dans la démarche ainsi illustrée, est moins dans la succession des étapes - on aurait pu s'engager dans la bifurcation qui s'est ouverte – que dans la nature du dialogue instauré entre élèves et professeur.

6.2. Cordées et passages délicats

L'enseignant doit avoir à l'esprit, plutôt que les étapes en elles-mêmes d'une démarche, *les liens qui les unissent*. Les *principes* qui sous-tendent le cheminement. " DiPHTeRIC " s'utilise donc en étant lu " en creux " : **Di P H Te R I C**



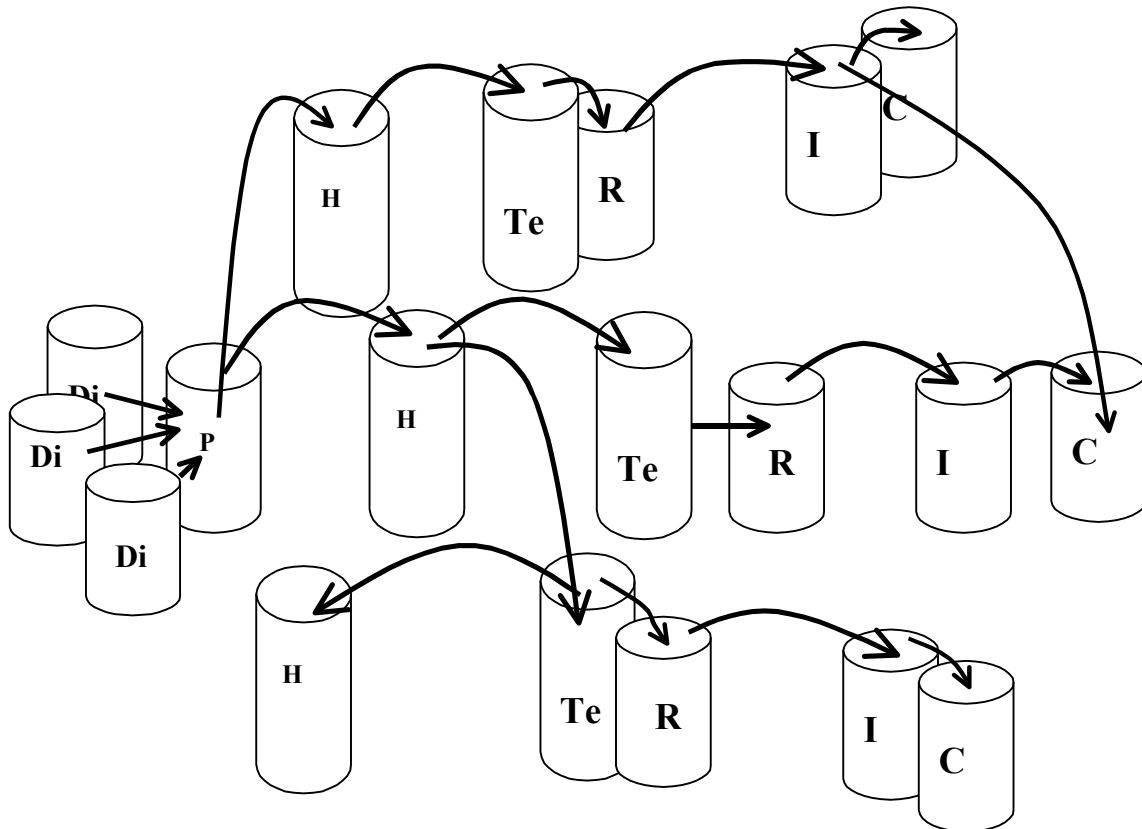
Les flèches indiquent ce qui ne se voit pas à la simple lecture du sigle : reliant entre elles les étapes, elles rappellent que l'essentiel se trouve dans la *manière de passer* de l'une à l'autre.

Comme dans une course en montagne, ce ne sont pas tant les arrêts en refuge qui importent, les stations, que les *parcours* d'un refuge à l'autre. Il ne s'agit de s'y rendre ni le plus vite possible ni par la voie la plus confortable, mais pas le cheminement qui nous en fera découvrir le plus ou qui, par ses difficultés à surmonter, nous procurera le plus de satisfaction. Si l'enseignant a en tête la suite logique de l'itinéraire, ce n'est pas pour jouer au sherpa que les élèves se contenteraient de suivre, ou qui les tracterait par-dessus toutes les difficultés, mais pour qu'il puisse mieux veiller aux points suivants :

- ne pas shunter d'étape par inadvertance, mais seulement par décision et avec un objectif précis ;
- ayant en vue l'étape suivante, l'obstacle à franchir, s'abstenir autant que possible d'y orienter directement la classe ;
- réfléchir à ce qu'on pourrait leur dire qui, les poussant à avancer, leur laisse cependant le champ le plus large possible si l'on veut que le franchissement de l'obstacle se fasse par leur activité intellectuelle.

Il s'agit donc, en pensant à la suite pour mieux éviter de la leur dire, de s'habituer à freiner des quatre fers pour ne pas se laisser emporter par notre tendance spontanée à fournir des solutions, directes ou à peine masquées. En parcourant DiPHTeRIC, qu'elles qu'en soient les bifurcations possibles, il y a toujours un saut important, et très formateur pour l'esprit, par-dessus les séracs de la construction des hypothèses, puis, à partir des hypothèses, des tests possibles. Shunter les hypothèses et les sauts qui l'entourent ne se conçoit que si, sur un sujet donné, on a choisi sciemment de ne se concentrer que sur la problématisation, ou sur l'interprétation de résultats.

Les passages délicats : $P \rightarrow H$ / $H \rightarrow Te$ / $R \rightarrow I$ (variable)



Dès lors qu'il a choisi d'engager ses élèves dans une investigation, l'enseignant doit donc savoir faire preuve de la retenue nécessaire. Suspendre, par exemple, la fourniture d'un document qui pourtant nous brûle les doigts puisque c'est bien lui qui contient des données cruciales, à une demande des élèves : le recours au document ne devrait venir qu'*en substitut logique* à une observation ou à une expérience non faisable en classe. Il pourrait être précédé d'une réflexion sur ce qu'on ferait si on n'en disposait pas, ou sur la manière dont l'ont établi ses auteurs.

Si l'on a placé les élèves face à un problème, c'est en effet pour qu'ils soient à une certaine distance intellectuelle de la solution. A eux de s'en rapprocher, et de dire comment. Mais si on veut qu'ils cherchent cette solution, il ne faut pas la leur mettre sous le nez pour qu'ils n'aient plus qu'à la constater. Il ne faut pas non plus les tirer le long du chemin, ni les y précéder : dans tous ces cas, la progression se fait au prix d'un effondrement de la tâche intellectuelle, et on voit mal dès lors à quoi servait de partir d'un problème à résoudre.

Autrement dit, il ne faut pas habituer les élèves à se laisser remorquer, ce à quoi ils consentent avec une grâce déconcertante, vers l'expérience qu'ils n'ont pas imaginée ou vers le document qu'ils n'ont pas réclamé, mais qui contient la solution. Mieux vaut une impulsion qui ne leur donne pas d'indices : à eux de dire quelles avancées seraient pertinentes.

A défaut de réaction, et en dernier ressort, il sera toujours temps de leur fournir des données complémentaires, de poser des questions moins ouvertes... Jusqu'à un certain point où il doit être clair pour les élèves que, pour cette étape, on quitte l'investigation. Mais pour mieux repartir ensuite : par exemple, s'ils n'ont su proposer aucun test logique à partir d'une hypothèse, on peut leur en fournir un avec ses résultats, parce qu'on estime encore intéressant qu'ils en fassent l'analyse et l'interprétation.

7. DiPHTeRIC et dialogue de classe

7.1. Les méthodes actives, de Socrate à Piaget

Si les concepts de l'athénien et du genevois restent bien distants, ils se sont tous deux interrogés, et bien d'autres entre-temps, sur la manière de chercher et d'apprendre, dans le domaine scientifique notamment.

Platon rapporte les propos de Socrate dans la célèbre scène du *Ménon* (82-85) où le jeune garçon cherche comment doubler la surface d'un carré, et que l'on a tout intérêt à faire analyser à des enseignants en formation, tant sont édifiants à la fois le procédé et les dialogues employés. “ Il va bel et bien découvrir en cherchant avec moi, moi qui ne fais que l'interroger sans rien lui enseigner ”, prétend Socrate. Sur le même modèle, une réflexion avec des élèves-professeurs permet d'établir un dialogue tel que le suivant, dont on peut espérer qu'ils se souviendront, évitant ainsi qu'ils s'égarerent à l'employer :

- Dis-moi donc, mon garçon, l'expérience que voici ne montre-t-elle pas que des bulles sortent de cette plante aquatique ?
- C'est vrai, par Zeus.
- Et celle-ci, placée dans les ténèbres, se comporte-t-elle de même ?
- Nullement.
- Ces bulles sont justement emplies de cette substance à laquelle les savants donnent le nom d'“ oxygène ”. En sorte que ce serait sous l'effet de la lumière que, d'après ce que tu dis, jeune élève, serait produit l'oxygène.
- Oui, parfaitement, professeur.

Ce qu'il y a par contre à retenir de l'enseignement socratique, en dehors de la participation de l'apprenant, c'est l'habileté avec laquelle, comme d'habitude, Socrate fait émerger et ébranle les certitudes du jeune homme, ses représentations dirait-on aujourd'hui (un carré de surface double a des côtés de longueur double) : “ penses-tu qu'il entreprendrait de chercher ou d'apprendre ce qu'il croyait savoir et qu'il ne sait pas, avant d'avoir pris conscience de son ignorance, de se voir plongé dans l'embarras et d'avoir conçu le désir de savoir ? (...) Le fait de l'avoir mis dans la torpeur lui a-t-il été profitable ? ” (84c).

Montaigne qui prône l'observation guidée par la curiosité et l'immersion dans l'expérience, donne son fameux conseil d'un précepteur qui ait “ plutost la teste bien faicte que bien pleine ”. Et Rousseau (*Émile*, 1762) : “ Rendez votre élève attentif aux phénomènes de la nature, bientôt vous le rendrez curieux ; mais, pour nourrir sa curiosité, ne vous pressez jamais de la satisfaire. Mettez les questions à sa portée, et laissez-les lui résoudre. Qu'il ne sache rien parce que vous le lui avez dit, mais parce qu'il l'a compris lui-même ”.

Jean Piaget enfin, qui écrivait sur l'enseignement des sciences un texte que tout professeur devrait garder à l'esprit (*in* Piaget 1988 p. 24-25) : “ les méthodes d'avenir devront faire une part de plus en plus grande à l'activité et aux tâtonnements des élèves ainsi qu'à la spontanéité des recherches dans la manipulation de dispositifs destinés à prouver ou à infirmer les hypothèses qu'ils auront pu faire d'eux-mêmes pour l'explication de tel ou tel phénomène élémentaire. (...) une expérience qu'on ne fait pas soi-même avec toute liberté d'initiative n'est, par définition, plus une expérience, mais un simple dressage sans valeur formatrice faute de compréhension suffisante du détail des démarches successives.

En un mot, *le principe fondamental des méthodes actives* ne saurait que s'inspirer de l'histoire des sciences et peut s'exprimer sous la forme suivante : **comprendre, c'est inventer, ou reconstruire par réinvention**, et il faudra bien se plier à de telles nécessités si l'on veut, dans l'avenir, façonner des individus capables de production ou de création et non pas seulement de répétition ”.

7.2. Trajectoire de la pensée : rebonds sur les interrogations

Dès lors que l'on cherche à comprendre en passant par le biais de la conjecture, le cheminement de l'esprit peut se décrire en termes d'*interrogations successives*.

On s'arrête sur un point obscur : **Comment ça se passe ?** Ou : **Comment ça se fait ?** (Ou, pour une simple question : **Quel est... ?**). On s'en fait une idée *a priori*. On entre dans le " jeu des possibles ", selon la jolie formule reprise par François Jacob (1981) d'un autre prix Nobel, l'immunologiste britannique Peter Brian Medawar (1915-1987), pour qui " l'enquête scientifique commence toujours par l'invention d'un monde possible " (1973). On imagine alors quelque chose qui éclairerait. On ne s'en tient pas là, on ne considère pas que l'idée est bonne parce qu'on l'a eue : on veut savoir si elle tient la route. Mais **comment savoir ?** C'est une étape fondamentale que celle qui consiste à se demander *comment savoir*. Elle sépare l'esprit dogmatique, qui ne se la pose pas, qui " sait ", de l'esprit scientifique. Comment savoir ? La réponse à cette interrogation tient souvent dans sa dernière syllabe : *voir*. On veut voir, c'est-à-dire se retrouver face à une observation qui nous en dira plus long. On détermine ce qu'on cherche à voir : quel prolongement de notre idée, dans quelles conditions précises. Mais **comment faire ?** Où percer du regard les secrets de dame nature, et, au besoin, comment la pousser judicieusement du coude ? On se demande alors, en fait, *comment faire pour voir*. Il faut se placer dans telles conditions d'observation, provoquée ou non. On observe alors, et ce qu'on voit de nouveau est conforme à nos attentes, ou non. Quel sens a ce que l'on a " découvert " (dans le sens de : *rendu visible*) ? **Ça veut dire quoi ?** " Ah, pourrait-on dire alors, *je vois...* ". Et pour terminer : **que vaut, finalement, l'idée de départ ?** (Pas si mal... ou rien du tout !).

" La démarche scientifique confronte sans relâche ce qui pourrait être et ce qui est ", résume F. Jacob. *Ce qui pourrait être* est énoncé sous forme d'une hypothèse, d'un " possible ", que teste la *confrontation avec ce qui est*, le réel.

On peut alors proposer de définir la science, sous sa forme la plus fréquente, comme la *restriction* du possible par le réel.

Ces interrogations successives sont celles que l'on se pose le long du chemin : les poser aux élèves (celles-là ou d'autres équivalentes, et si nécessaire seulement) permet, sans donner de réponse, de les habituer à *se les poser*.

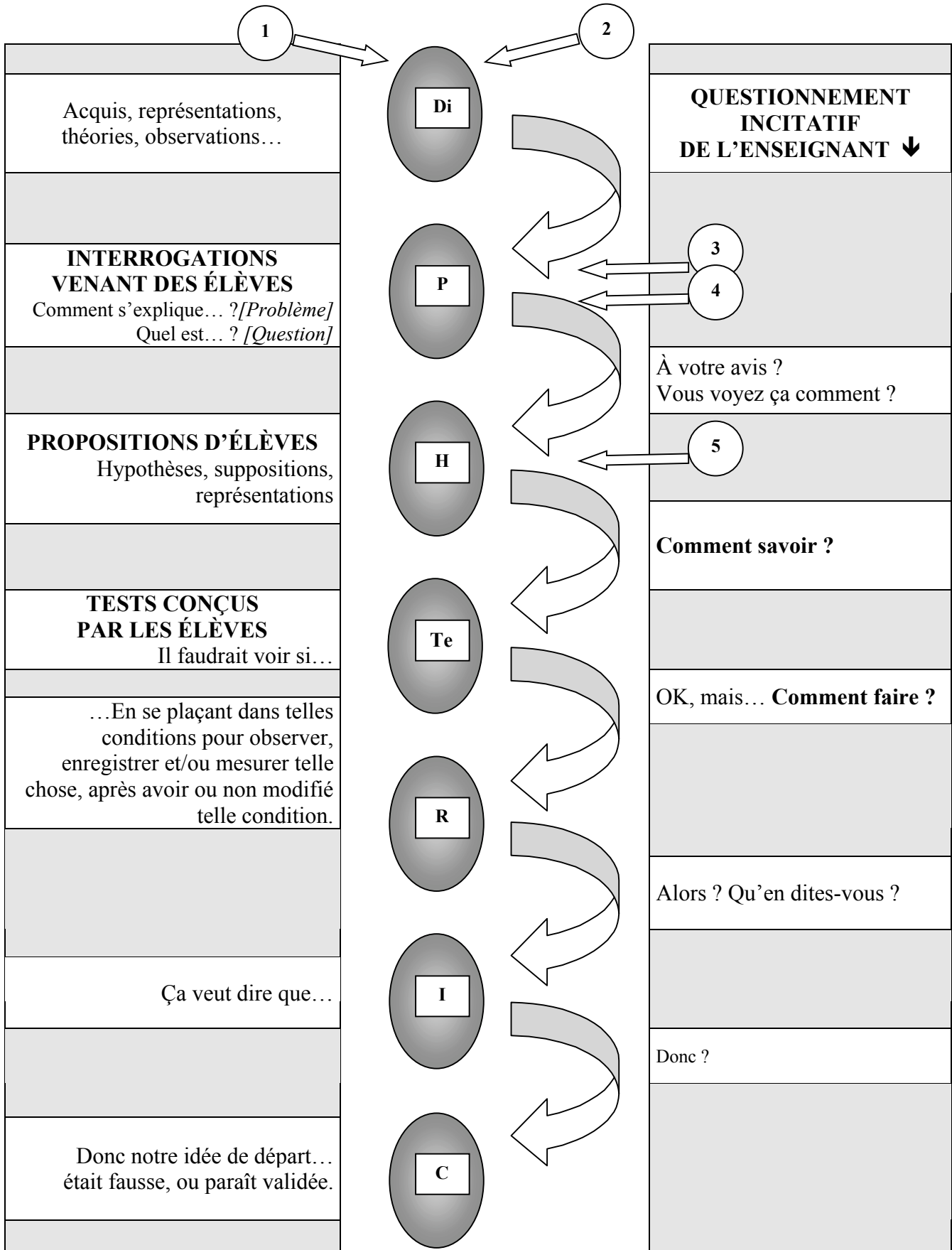
7.3. Types de dialogues en classe

Par quoi débiter une séquence d'investigation, et comment y utiliser DiPHTeRIC ? Différentes entrées sont possibles, l'essentiel étant de garder en ligne de mire le fait que l'on cherche à **obtenir des propositions** des élèves et non à leur fournir des réponses, directement ou non.

Le tableau I montre un exemple du questionnement incitatif possible de l'enseignant, en même temps qu'y sont indiquées, de ① à ⑤, les diverses entrées possibles détaillées dans le tableau II.

Dans ces tableaux, **P** désigne les problèmes scientifiques aussi bien que les questions plus simples, et **H** désigne de manière générique : les hypothèses explicatives (pour les problèmes), les hypothèses ou suppositions (pour les questions), et les représentations formulées par les élèves, à traiter en hypothèses (voir entrée ⑤).

Tableau I **TYPES DE DIALOGUES EN CLASSE**
ET ENTRÉES POSSIBLES DANS UNE SÉQUENCE (① à ⑤)



Voies d'entrée (tableau II) : Nous avons insisté sur le fait que l'enchaînement DiPHTeRIC ne devait pas se concevoir comme linéaire et dépourvu de bifurcations : cela signifie que l'entrée dans une séquence nouvelle peut se faire aussi bien à partir de données initiales ou d'interrogations *prévues* (cinq voies décrites ci-dessous) qu'à partir de ramifications nées *spontanément* de l'activité des élèves, sous forme de propositions qu'ils avancent ou de questions qu'ils se posent en cours de route.

- **Entrées programmées** (pour les voies d'entrée ② à ⑤ ne sont mentionnées que les différences avec l'entrée ①, toutes ces voies se rejoignant au moment de l'obtention des propositions d'élèves).

Entrées au niveau des données initiales [Di].

Entrée ① :

1. Le travail antérieur de la classe apporte des données nouvelles qui s'intègrent aux acquis et aux idées des élèves, incluant leurs représentations (non recueillies à ce stade) : cela peut suffire à engendrer un questionnement spontané, non sollicité.
2. **Interrogations venant des élèves** : après discussion permettant le rejet réfléchi des éventuelles questions incohérentes ou en opposition avec les acquis, sont retenues celles dont la réponse apporte une information utile à la compréhension, et/ou les demandes d'explications (problèmes).
3. Le professeur *s'abstient de répondre* et retourne leurs interrogations aux élèves, de façon à obtenir de leur part des propositions.
4. Des **propositions venant des élèves** sont alors obtenues. Leur adéquation avec les interrogations retenues peut être discutée par la classe.
5. A ce stade, avant de s'engager dans un test, le professeur doit de nouveau *s'abstenir de s'exprimer* : les élèves ont proposé, bon... Ils doivent apprendre à ne pas s'en tenir à leurs propositions, à devenir critiques vis-à-vis de ce qu'ils croient possibles. Moins le professeur aura à intervenir à ce stade et plus il aura avancé dans la formation de l'esprit scientifique des élèves. Bien sûr, il pourrait leur dire : " Comment tester votre idée ? ", ou mieux : " Comment savoir ce qu'il en est ? ", et mieux encore : " Et maintenant ? ". Mais l'idéal, c'est qu'il n'ait rien à dire du tout.

Entrée ② : Le professeur introduit une donnée nouvelle pour déclencher le questionnement.

Entrées au niveau des interrogations à traiter par la classe [P].

Entrée ③ : Le professeur sollicite directement les interrogations des élèves, en vue d'obtenir questions et/ou problèmes à traiter.

Entrée ④ : Le professeur pose lui-même, d'emblée, les interrogations qui orientent la démarche.

Entrée directe au niveau des propositions des élèves [H].



Entrée ⑤ : Recueil des représentations, à traiter en hypothèses : si elles diffèrent, le professeur pourra (si nécessaire) demander : " Comment savoir qui a raison ? ", et si elles sont communes à la classe (plus rare) : " Comment savoir si (ou montrer que) c'est bien ça ? ".

Entrées non programmées

À tout moment, une question d'élève, une hypothèse ou une affirmation, fausse (par exemple correspondant à une représentation erronée), ou juste mais *non fondée*, peut surgir au cours d'une séquence. Chacune peut fournir une ouverture vers une nouvelle investigation, que l'enseignant peut choisir, ou non, de suivre dans le prolongement de celle qui est en cours. Mais l'intervention de l'élève se faisant fréquemment sous forme interrogative (même s'il affirme, il cherche souvent l'approbation), l'enseignant a toujours intérêt à lui *renvoyer sa question* d'une manière ou d'une autre : " Qu'en penses-tu ? ", " Tu crois ? " ou encore " Comment en être sûr ? ", renvoi qui dirige vers l'une ou l'autre des étapes de la démarche scientifique. Très formateur pour l'esprit scientifique des élèves, ce " renvoi à leurs chères études ", ce **ping-pong** intellectuel n'est en général pas spontané chez l'enseignant qui va plutôt s'attacher à donner la réponse, alors que rien ne lui interdit de le faire dans un second temps s'il ne souhaite pas mener toute une séquence sur le point discuté.

Tableau II

ENTRÉE DANS UNE SÉQUENCE**au niveau des Données initiales (Di), du questionnement (P) ou bien des propositions (H)***Quelle que soit l'entrée choisie, on aboutit à des propositions d'élèves (hypothèses, suppositions, représentations) à tester.*

ENTRÉES		ÉLÈVES 	 PROFESSEUR
Di	Entrée 1	<p>1. Travail antérieur de la classe</p> <p>↓</p> <p>2. Interrogations venant des élèves</p> <p>↘</p> <p>4. Propositions des élèves</p>	<p>3. À votre avis ? Vous voyez ça comment ?</p>
	Entrée 2	<p>2. Interrogations venant des élèves</p> <p>↘</p> <p>4. Propositions des élèves</p>	<p>1. Données fournies par le professeur (objet, document...)</p> <p>3. À votre avis ? Vous voyez ça comment ?</p>
P	Entrée 3	<p>2. Interrogations venant des élèves</p> <p>↘</p> <p>4. Propositions des élèves</p>	<p>1. Sollicitation par le professeur : " <i>Quelles questions vous posez-vous sur... ?</i> "</p> <p>3. À votre avis ? Vous voyez ça comment ?</p>
	Entrée 4	<p>2. Propositions des élèves</p>	<p>1. Problème ou question posé(e) par le professeur (<i>comment s'explique... ? Quel est... ?</i>)</p>
H	Entrée 5	<p>2. Propositions des élèves</p>	<p>1. <i>Que savez-vous sur... ?</i> Représentations recueillies par le professeur (+ acquis)</p>


**SUITE = Te : TESTS CONÇUS ET REALISES PAR LES ELEVES.**






7.4. Du fleuve tranquille à la voie engagée

Le dialogue et le non-dit ont une importance majeure dans les séquences d'investigation, si l'objectif principal y est bien la formation de l'esprit scientifique des élèves.

La réflexion sur le type de propos à tenir en amont du passage d'une étape à l'autre (→) au cours d'une succession $D_i \rightarrow P \rightarrow H \rightarrow Te \rightarrow R \rightarrow I \rightarrow C$ (avec bifurcations ou non) permet de transformer des séquences du **type A** ci-dessous (voir tableau), à faibles parts d'initiative et d'implication intellectuelle des élèves, en séquences de **type D**, dans lesquelles ces parts sont élevées – en passant si on le juge nécessaire par des séquences de types intermédiaires comme **B** et **C**.

En fonction du temps que l'on décide de consacrer à une séquence, on bien entendu peut naviguer de **A** à **D**, ou de **D** à **A** : accordéon intra-investigation.

 = matériel ou document. Les questions ou silences sont ceux de l'enseignant, sauf mention contraire.

A	“ Le problème que l'on se pose est...”	<i>H absentes.</i> “ Pour résoudre ce problème, voici une expérience (ou un document)... ”.		 imposé	Quelle I ?	Quelle C ?	 initiative, implication intellectuelle	
	Di→P	P→H	H→Te	Te→R		R→I		I→C
B	P imposé ou demandé aux élèves	Quelles H ?	Quels Tests ?	 répondant à une proposition		Quelle I ?		Quelle C ?
C	P imposé ou demandé ou venant des élèves	Comment voyez-vous ça ?	Comment savoir ?	Comment faire ?	 répondant à une proposition	Donc ?		Quelle C ?
D	Un élève s'interroge (Comment ça se fait que... ?)	D'après toi ?	Ah bon ? Ou : tu crois ? Et vous ?	(Ne dit rien)	 répondant à une proposition	Alors ?	(Ne dit rien)	

7.5. La place centrale des hypothèses

Un des rôles primordiaux de l'enseignant au cours d'une telle séquence de résolution de problème est celui de *récepteur des hypothèses* : il est de première importance, si l'on ne veut pas biaiser l'investigation, que l'enseignant accueille de la même manière les hypothèses qu'il sait vraies ou les fausses, dès lors qu'elles sont logiques. Les élèves, trop habitués aux devinettes, remarquent très vite le contentement de l'enseignant qui entend l'hypothèse attendue, ou bien sa surprise face à une conjecture imprévue. Un travail d'analyse de séquences vidéo mené en formation montre comment un enseignant recueille, à propos de l'alternance de lits clairs et sombres dans un gneiss, roche métamorphique, l'hypothèse “ ce sont des dépôts sédimentaires superposés ” : “ aaaaaah ouiiii, dit-il, ça pourrait être une hypothèse ”... D'emblée, l'élève a compris que ce n'était pas ça et passe à autre chose ; de toute façon l'enseignant poursuit : “ une autre hypothèse ?... ”. Pourtant, la proposition est parfaitement recevable -d'autant qu'ils viennent justement d'étudier les roches sédimentaires. Dans une démarche historique, les élèves auraient d'ailleurs rencontré une telle conception qui, loin d'être absurde, se retrouve chez des géologues au début du 19^{ème} siècle. S'il avait dans son esprit mis de côté la “ bonne ” hypothèse (d'ailleurs dans ce cas introuvable par la

classe), il lui aurait été plus facile de se **mettre à la place des élèves**, et d'anticiper sur leurs propositions. Ils continuent donc à lancer des idées, plus ou moins appropriées au sujet et en tout cas sans souci de préciser en quoi cela expliquerait l'aspect de la roche, jusqu'à ce que l'un d'entre eux, dans un coin, parle de "chaleur" (et il aurait sans doute aussi bien pu lancer "froid" pour voir, à la réaction du prof, s'il ne tombait pas juste) : " Ah ! Vous avez entendu votre camarade ? C'est intéressant ce qu'il a dit là, écoutez-le !... Tu peux répéter pour tout le monde ? "

Comment éviter ce jeu de la devinette, cette *pédagogie de la pêche à la ligne* comme la nomme Gérard de Vecchi (1992) ? Comment faire, d'un autre côté, pour ne pas repousser d'emblée une hypothèse inattendue, fautive peut-être, mais logique ? Et une fois admise, que faire de cette encombrante hypothèse fautive ? Le mieux est de s'arrêter un instant à la proposition émise, vraie ou fautive, de la faire préciser éventuellement, et de montrer qu'on y réfléchit, en invitant les autres à en faire autant et à dire ce qu'ils en pensent : ce temps d'arrêt systématiquement marqué éloigne le risque de montrer qu'on a identifié la bonne solution, ou que l'on est interloqué par une autre.

Les élèves doivent comprendre que l'important, à ce stade, est moins de tomber sur la bonne solution, que de dire pourquoi elle pourrait être bonne. Habituez-les aux critères qui rendent recevable une hypothèse : posséder un pouvoir explicatif pour le problème étudié, et ne pas être en contradiction avec les acquis. Un élève devrait d'autre part émettre son hypothèse en direction *de la classe*, et non du seul professeur, et c'est la classe qui devrait l'analyser. Les propositions sont d'ailleurs davantage travaillées quand on laisse aux élèves le temps de mener une réflexion en petits groupes avant qu'ils exposent leurs idées (une simple minute peut y suffire). Ils sont malgré tout très habitués à rechercher une approbation ou une désapprobation professorale. Un bon moyen est alors de se montrer systématiquement sceptique (ou approbateur) : " Ah bon ? Tu crois que c'est possible ? Pourquoi pas... ". Les élèves seront rétrospectivement surpris que la bonne idée ait été retenue, parmi d'autre, avec si peu d'enthousiasme, mais sauront qu'ils ne peuvent plus se fier à la seule confrontation de leurs hypothèses avec la moue du professeur, plutôt qu'avec le réel. Et que seule la cohérence, et non la vérité, est attendue.

Que faire, maintenant, d'une hypothèse aussi inattendue que solide ? Demander aux élèves les moyens de la tester bien entendu : enseignant la démarche scientifique, le professeur ne saurait s'y soustraire. Ainsi, si la roche devait ses zébrures à une superposition de dépôts se succédant dans le temps, qu'est-ce que des observations ou des mesures devraient révéler ? Attention : le test ne pourra peut-être pas être réalisé en classe ; il y faudrait dans certains cas des moyens de mesure sophistiqués, mais cela ne doit pas restreindre le champ des propositions de mise à l'épreuve : l'essentiel est ici que les élèves imaginent un test logique, quitte à ce qu'après sa formulation l'enseignant s'en tienne à fournir le résultat qu'on pourrait obtenir.

À choisir, il me paraît préférable, pour la formation de l'esprit scientifique, que les élèves **conçoivent des tests sans les réaliser plutôt qu'ils les réalisent sans les avoir conçus**. Mais, bien sûr, l'un n'empêche pas l'autre.

" Que même j'en supposerai ici quelques-unes que je crois fausses " (Descartes 1644, *III*, 45). Pour cet important travail sur le raisonnement des élèves, l'enseignant peut aussi décider, en situation d'investigation, d'*introduire des hypothèses supplémentaires*, en plus de celles qu'ils ont imaginées, même s'il les sait fautes (ou aussi bien si elles sont vraies), soit parce qu'il les connaît de l'histoire des sciences, soit qu'il s'agisse de celles émises dans un autre groupe ou une autre classe... " Vous n'avez pas d'hypothèses, ou vous n'en avez qu'une ? Voyons ce que j'ai en stock dans mes notes de l'année dernière, ou ce qui se disait au siècle dernier... Ah ! Que dites-vous de l'automatisme pulmonaire (comme il y a un automatisme cardiaque) ? J'ai aussi des nerfs qui arrivent sur les poumons et les mettent en mouvement ; il y en a même un pour qui le nerf fait descendre le fond de la cage thoracique, et ça aspire l'air par le nez !... "

Dans le monde de la recherche, les bonnes idées sont à tester quelle que soit leur provenance, et il n'est pas mauvais de cultiver chez les élèves le doute sur ce qu'ils reçoivent et l'habitude de la mise à l'épreuve.

8. Cheminer en 4x4

À la suite de ces réflexions, on pourrait peut-être croire qu'il n'y a de salut que dans les démarches d'investigation et que tout peut s'enseigner ainsi : ce n'est pourtant pas le cas. Trois axes pour la *formation de l'esprit scientifique*, disais-je, mais quatre pour *l'enseignement des sciences*. S'y ajoute en effet un axe entièrement consacré à la transmission des résultats scientifiques (" cours explicatif ", **axe 4**), des résultats dont les élèves pourraient justement savoir, par leur implication dans les temps d'investigation de l'**axe 1** (et plus encore si se développe l'exploration des deux autres axes) par quelles voies ils furent conquis.

La transmission " directe " de connaissances est presque aussi décriée que pratiquée. En dehors du cours magistral caricatural sans réel échange avec les élèves, cette approche, si elle est souvent plus rapide, n'est pas toujours plus aisée que l'approche par investigation si l'on s'inquiète de la compréhension de ce que l'on explique ; pas moins non plus : c'est simplement une technique différente, dans laquelle pourront se sentir plus à l'aise certains élèves.

Car il y a une vertu à l'explication, dans son sens originel : déplier, exposer, montrer, attirer l'attention sur les causes, sur les liens, décortiquer les mécanismes... en utilisant le vocabulaire le moins ésotérique possible (ce qui n'exclut pas d'introduire les termes à connaître), en variant les supports présentés : dans ce cadre, les expériences d'illustration ou d'application seront clairement présentées comme telles, et non comme d'artificielles investigations ; en maniant l'analogie, en modélisant, en reprenant l'explication d'une autre manière, en mimant... Je n'ai jamais mieux compris les subtilités des étapes du développement de l'embryon que quand Charles Houillon, dans un amphithéâtre de Jussieu, remontait sa veste par-dessus sa tête et se contorsionnait en pleine gastrulation. Je n'ai jamais mieux senti ce que pouvaient être les cellules dont je suis constitué qu'en suivant, émerveillé, le prix Nobel Christian de Duve (1987) avec palmes et masque dans l'océan cytoplasmique, au fond de gouffres peuplés des mille-pattes hirsutes, polysomes qui serpentent sur des parois d'où se détachent les fils de soie que sont les protéines fraîchement tricotées... Car c'est tout un art aussi de mettre en scène notre compréhension des secrets de la nature, avec en première ligne l'émerveillement au service de la pédagogie, tant " il n'y a rien dans la nature de la science qui demande qu'elle soit solennelle ". Tout artifice pour rendre intelligible sans déformer doit alors primer, et, assure-t-il, " à ceux qui s'offusqueraient d'un tel artifice dans un contexte scientifique sérieux et qui répugneraient à être transformés en minuscules "cytonautes", j'offre ma sympathie mais non mes excuses ".

Dans cet axe, le dialogue doit être associé à l'explication, en donnant aux élèves la possibilité d'intervenir dès que quelque chose n'est pas clair, en sollicitant encore leurs questions, en laissant un élève qui a compris expliquer à sa manière...

Je ne passerai pas le même temps, je ne travaillerai pas au développement des mêmes compétences chez les élèves et je ne motiverai pas chacun de la même manière si, au sujet par exemple de la reproduction, je leur explique, en illustrant mes propos des documents adéquats et en sollicitant leur questionnement, que les différences entre gamètes tiennent à des chromosomes, que chacun porte une succession de gènes, que chaque gène est lié à un caractère et présente des variations dans sa structure... ou si je les laisse s'interroger sur le problème des différences entre enfants d'une même famille et s'engager dans une démarche de résolution de ce problème, ou encore si je convoque les idées d'Hippocrate, Maupertuis et Buffon, les prodigieuses découvertes du jeune médecin De Graaf et du drapier de Delft Leeuwenhoek, les conceptions qui opposèrent dès lors ovistes et animalculistes... et les grenouilles à culottes, gants et bretelles de Réaumur !

9. Exercice social de l'esprit scientifique : “ fabriquons des emmerdeurs ”

“ Le but des enseignants devrait être de fabriquer des emmerdeurs ”, dit Albert Jacquard⁴⁰. Voilà un projet d'établissement qui aurait de l'allure. Les instructions officielles les plus récentes traduisent peut-être le souhait du célèbre généticien : “ l'enseignement proposé participe au développement de l'esprit critique ” (programme de 1^oS, 2001).

Former l'esprit scientifique et critique des élèves, c'est bien, leur fournir l'occasion de l'exercer dans la société, c'est mieux. Mais quand l'élève range dans son sac ses papiers où sont bien notées les procédures pour soumettre avec toute la rigueur requise ses idées à l'épreuve des faits, et que les feuilles glissent contre la couverture glacée du magazine lui annonçant tout ce que lui réservera l'année nouvelle selon les astres, personne ne s'interroge. Pas davantage si sa soirée est consacrée au tirage des tarots ou à utiliser un pendule pour retrouver son chat perdu... dont on comprend la fuite. Avant le bac, les devantures des pharmacies lui vanteront les pilules pour la mémoire ou les oligoéléments, sans doute pour stimuler son esprit critique.

“ On la voit encore plus ou moins mêlée à la religion et au surnaturel. Le merveilleux et la superstition y jouent un grand rôle. (...) Cet état de choses est la preuve la plus claire que la méthode expérimentale n'est point encore arrivée dans la médecine ”. Ce que disait Claude Bernard (*Intro.* p. 77) de la médecine, on pourrait aujourd'hui le dire aussi de l'éducation. Pour Jean Rostand, il faut “ Enseigner aux jeunes l'esprit critique, les prémunir contre les mensonges de la parole et de l'imprimé, créer en eux un terrain spirituel où la crédulité ne puisse prendre racine... et surtout les mettre en garde contre le témoignage humain ”.⁴¹ Quarante ans après, Albert Jacquard (1998) fait le même constat et attend de l'école qu'elle joue “ son rôle premier ” sans lequel nos efforts sont bien vains : “ la diffusion de l'attitude scientifique, à base de doute et de remise en question, semble s'accompagner dans nos cultures d'un développement des croyances les plus grossières, les plus infantiles, les plus irrationnelles. (...) Cette pensée prélogique **ruine les fondements mêmes d'une attitude vraiment scientifique** ”. La science est même, pour André Giordan (1999), “ un état d'esprit de contestation méthodique. (...) l'éducation scientifique actuelle est trop rarement un enseignement où l'on essaye de développer l'esprit critique. (...) Voyantes, cartomanciennes, numérologues tiennent actuellement le haut du pavé, de la télévision au Palais Bourbon ! ”. Dans un récent numéro de *Pour La Science* (septembre 2001), André Langaney fulmine contre la “ génologie ” : “ pour retrouver le passé et prédire le futur, l'examen de l'ADN est la nouvelle charlatanerie ”.

Dans une société où abondent croyances infondées et superstitions, les sujets ne manquent pas pour laisser les élèves mener des travaux “ socialement utiles ” dans lesquels ils s'interrogeraient sur les critères de validité méthodologique appliqués à des assertions ou à des pratiques sociales controversées, dans la veine du sujet traité en 2000-2001 sur les vertus antidépressives supposées du chocolat.⁴² **Travaux d'enquête** "d'intérêt public" qu'ils pourraient mener dans le cadre d'un TPE sur, par exemple, la numérologie, l'iridologie, les effets de la caféine, de la vitamine C ou d'Oscilloccinum, ou encore les prédictions astrologiques ou les vertus prêtées aux eaux minérales, et autres assertions publicitaires (du type "Omo lave plus blanc" !) ou pharmaceutiques (crèmes amincissantes, etc.) aussi quotidiennes que douteuses.

À titre d'exemple de ce que pourraient produire ces *travaux d'enquête*, on peut prendre comme modèle, plus élaboré bien sûr, le **Rapport sur le thermalisme français** publié par l'Inspection Générale des Affaires Sociales en octobre 2000 et son coût pour l'assurance maladie⁴³ : “ Si un consensus fort existe quant à l'efficacité du thermalisme sur l'économie locale, il n'en est pas de même sur son intérêt thérapeutique ”, note le rapport avec ironie. Il cite le scepticisme de

⁴⁰ Cité par G. de Vecchi et N. Carmona-Magnaldi in *Faire construire des savoirs*, Hachette Éducation 1996, p.93.

⁴¹ Cité in Rostand, un biologiste engagé, *Les génies de la science*, Pour la science mai-août 2001.

⁴² *Mise en oeuvre des TPE*, Lycées - rentrée 2001, Direction de l'enseignement scolaire, p. 37.

⁴³ rapport officiel consultable sur <http://www.sante.gouv.fr/htm/actu/thermal/sommaire.htm>.

Montaigne et de Voltaire, qui initie une contestation “ devenue de plus en plus forte, au fur et à mesure que la médecine se dégageait de son empirisme traditionnel pour s’orienter vers une médecine scientifique, fondée sur des faits avérés et démontrés ”. Si les élèves pouvaient conclure eux-mêmes, de leur étude de la littérature, comme l’auteur d’un article sur ce sujet : “ Les eaux thermales ont-elles des vertus curatives ? Rien n’est moins sûr ! En tout cas, la chose reste à démontrer et personne ne semble vraiment pressé d’avoir la réponse ”⁴⁴, on aurait au moins là un TPE qui aurait contribué à la formation de l’esprit scientifique et de l’esprit critique des élèves, un vrai *TIFE (Travail d’Intérêt Public et d’Enquête)* ! S’ils ne peuvent mener l’étude médicale par eux-mêmes, leur enquête peut tout du moins les amener à demander aux établissements sur quoi ils se basent d’autre que sur la tradition et l’opinion des curistes, quels sont leurs propres résultats d’évaluation thérapeutique ou ceux d’organismes indépendants, les soumettre pour avis à des spécialistes... Et si ces évaluations n’existent pas, le faire savoir tout en exposant ce qu’il faudrait faire : le rapport cite l’essai en simple ou double aveugle contre placebo.

Ils peuvent aussi choisir quelque chose de testable par eux-mêmes, par exemple les crèmes aminçissantes, et établir le protocole (garder une jambe témoin, étendre l’échantillonnage en faisant participer tout le lycée, utiliser un placebo, faire une analyse statistique...) avant de le faire valider par des spécialistes sollicités auprès du ministère de la santé, demander aux fabricants sur quoi ils fondent leur assurance... et peut-être reconnaître qu’ils avaient raison : cette fois le résultat n’est pas forcément connu d’avance par l’enseignant !

Il ne serait pas difficile non plus pour des élèves de mener une enquête sur les prédictions astrologiques, passées ou en cours, en analysant leur plus ou moins grande précision et en les confrontant aux faits, d’en faire soi-même sans recourir aux astres pour disposer d’un témoin, de faire une étude statistique, de consulter la partie “ efficacité ” de la thèse récemment soutenue avec succès par une astrologue réputée⁴⁵ et d’interroger les membres de son jury sur cet aspect... “ Pour tenter d’ouvrir les yeux sur la monstrueuse manipulation des esprits que constitue le bombardement astrologique ou paranormal de nombreux médias, deux types d’arguments peuvent être avancés : une analyse réellement scientifique des influences astrales supposées, une étude rétrospective des prévisions antérieures ”, préconise Albert Jacquard (1998). L’étude serait tout aussi aisée pour la numérologie.

Les contributions au colloque organisé au Muséum National d’Histoire Naturelle par les chercheurs du CNRS J. Dubessy (géologue) et G. Lecointre (phylogénéticien) sur les impostures intellectuelles sont réunies dans un ouvrage⁴⁶ dont l’avant-propos interpelle “ les professeurs de la République chargés d’enseigner les Sciences de la Vie et de la Terre ”. On peut en extraire l’exemple suivant, édifiant : en 1992, un autre titulaire d’un “ doctorat ” (en fait... acheté en Floride), créationniste, donna une série de conférences où il avançait des *preuves géologiques* de sa découverte de l’Arche de Noé. “ Les journaux, la radio et la télévision acceptèrent et publièrent ces affirmations sans aucun esprit critique ”, constata Ian Plimer, Professeur de Géologie à l’Université de Melbourne et président du Conseil australien des Géosciences. Il décida de participer à l’une de ces conférences : “ Je fus éjecté par la police, pour avoir posé une question sur la géologie au cours d’une réunion publique, au sein même d’une université ”. Menacé de mort, il porte plainte, mais n’ayant pas le soutien financier massif des créationnistes pour les frais de justice, il dut, tout en dirigeant trente-huit thèses, vendre sa maison, prendre un arrêt-maladie sans salaire en 1998, puis être mis en faillite avant que son salaire ne soit saisi... Même si les choses s’arrangèrent en 2001 pour ce professeur courageux et opiniâtre, nous aurions sans doute tort de penser que parce l’aventure s’est déroulée aux antipodes nous ne devons en tirer aucun enseignement.

⁴⁴ Les cures thermales sont-elles efficaces ? Jean Brissonnet, *Sciences et Pseudo-sciences* n°249, novembre 2001.

⁴⁵ E. Teissier, *Situation épistémologique de l’astrologie à travers l’ambivalence fascination / rejet dans les sociétés post-modernes*, thèse de sociologie, Université Paris V, avril 2001.

⁴⁶ *Intrusions spiritualistes et impostures intellectuelles en sciences*, dir. J. Dubessy et G. Lecointre, Syllepse 2001.

Ne pas engager les élèves à se servir par eux-mêmes du levier puissant de l'esprit scientifique dans une société si perméable aux dérives intellectuelles n'est pas sans conséquences, à une époque où l'on entend réclamer un enseignement de l'astrologie en Sorbonne. Il est vrai que l'aptitude à l'emploi de nombre de nos élèves sera évaluée en fonction de leur signe astral ou de l'analyse de leurs écritures : lorsqu'il en sera de même des candidats au bac et aux concours d'enseignants, on aura moins de copies à corriger.

Nous ne parviendrons peut-être pas à forger un Montaigne ou un Voltaire, ce dernier faisant un parfait exemple de ces " emmerdeurs " qu'affectionne Jacquard. Mais nous pouvons méditer cette recommandation limpide de son compagnon d'esprit Diderot, dont on a évoqué la vision pénétrante de la démarche scientifique, et qui vaut pour l'enseignement comme pour la vie sociale :

“ Pour ébranler une hypothèse, il ne faut quelquefois que la pousser aussi loin qu'elle peut aller ”.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTOLFI J.-P., GIORDAN A., GOHAU G., HOST V., MARTINAND J.-L., RUMELHARD G., ZADOUNAÏSKY G. *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* PUF 1978.
- ASTOLFI J.-P., PETERFALVI B. et VERIN A. *Comment les enfants apprennent les sciences*, Retz 1998.
- BACHELARD G. *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin 1938.
- BACON F. *Novum Organum*, PUF 1986 (1^{er} éd. 1620).
- BERNARD C. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Garnier-Flammarion 1966 (1^{er} éd. 1865).
- BERNARD C. *Principes de médecine expérimentale*, PUF, 2^e éd. 1987.
- BOMCHIL S. et DARLEY B. " L'enseignement des sciences expérimentales est-il vraiment inductiviste ? ". *Aster* 26, INRP 1998.
- CARIOU J.-Y. " Lexique sommaire en didactique des sciences ", *document interne*, IUFM, Paris 1997.
- CLEMENT P. " La biologie et sa didactique, dix ans de recherche ". *Aster*, 27, INRP 1998.
- COQUIDE M. " Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles ". *Aster*, 26, INRP 1998.
- CROMBIE A. C. *Histoire des sciences, de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*. 1952. PUF, 1959.
- DE DUVE C. *Une visite guidée de la cellule vivante*, Bibliothèque Pour la Science, Belin 1987.
- DEMOUNEM R. et ASTOLFI J.-P. *Didactique des sciences de la vie et de la Terre*. Nathan 1996.
- DE VECCHI G. *Aider les élèves à apprendre*, Hachette Éducation 1992.
- DEVELAY M. " Sur la méthode expérimentale ", *Aster*, 8, INRP 1989.
- EINSTEIN A. et INFELD L. *L'évolution des idées en physique*, 1936, Flammarion 1983.
- GIL-PEREZ D. " Apprendre les sciences par une démarche de recherche scientifique ". *Aster* 17, INRP 1993.
- GIORDAN A. *Rien ne sert de courir, il faut partir à point*. Thèse (Paris V et Paris VII) 1976.
- GIORDAN A. *Une pédagogie pour les sciences expérimentales*. Centurion 1978.
- GIORDAN A. *Une didactique pour les sciences expérimentales*. Belin 1999.
- GRMEK M. *Raisonnement expérimental et recherches toxicologiques chez Claude Bernard*. Genève : Droz 1973.
- GRMEK M. *Claude Bernard et la méthode expérimentale*. Payot 1991.
- GRMEK M. *Le chaudron de Médée. L'expérimentation sur le vivant dans l'Antiquité*. Institut Synthélabo 1997.
- GUICHARD J. *Observer pour comprendre*, Hachette Éducation, 1998.
- JACOB F. *Le jeu des possibles*, Fayard 1981.
- JACQUARD A. *L'équation du nénuphar*, Calmann-Lévy 1998.
- LALANNE, J. " Le développement de la pensée scientifique (orientation biologique) chez les enfants de 6 à 14 ans ". *Aster*, 1, INRP 1985.
- LOEWI, O. *An Autobiographic Sketch*, Univ. of Chicago Press 1960.
- MEDAWAR P.B. *The Hope of Progress*. Doubleday, New York, 1973.
- MEIRIEU P. *Apprendre... Oui, mais comment*. ESF 1987.
- MONCHAMP A. *in* J. Colomb (dir.), *Les enseignements en Troisième et en Seconde, ruptures et continuités*, INRP, 1993.
- OLDROYD D. *The Arch of Knowledge*. Kensington (Australie) : NSW University Press, 1986.
- ORLANDI E. " Conceptions des enseignants sur la démarche expérimentale ", *Aster* 13, INRP, 1991.
- PACCAUD M. et VUALA J. *Biologie Géologie*, Concours de Professeur des Écoles, Hatier 1999.
- PIAGET J. *La représentation du monde chez l'enfant*, PUF 1926.
- PIAGET J. *Où va l'éducation ?* UNESCO 1948 et 1972, réimpression Folio essais 1988.
- PINELLI P. et LEFEVRE R. " Étudiants-chercheurs " : une proposition en électrocinétique ". *Aster* 17, INRP 1993.
- POPPER K. *La logique de la découverte scientifique*, 1934, 4^e éd. Payot 1989.
- POPPER K. *Conjectures et réfutations*, 1963, Payot 1994.
- SAGAN C. *Cosmos*. 1980, Marabout 1981.